

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В ЧЕРНОГОЛОВКЕ
НИЦ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ТОМСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ТОМСКИЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Е. И. Азаркевич, А. Н. Диденко, А. Г. Жерлицын,
Ю. В. Карпушин, А. А. Леонтьев, Г. В. Мельников, В. Б. Минцев,
А. Е. Ушнурцев, В. Е. Фортов, В. И. Цветков, В. Б. Шнейдер,
Б. К. Ясельский

94-4101

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ
ВЕЩЕСТВ

(Препринт)

Generation of High
Power Microwave Radiation
with the Aid of High
Explosive (Preprint)

V. MINTSEV

20010926 143

Черноголовка 1992

А Н Н О Т А Ц И Я

Приведены экспериментальные исследования принципов генерации мощного импульсного СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ. В качестве источника электронного пучка и СВЧ-генератора выбран виркатор на основе триода с виртуальным катодом. Для преобразования энергии взрыва в электромагнитную разработаны высоковольтные спиральные взрывомагнитные генераторы с перехватом магнитного потока двух типов: цилиндрические с осевым инициированием и компактные конические генераторы со скользящим контактом, позволяющие получить в индуктивной нагрузке за время 7-10 мкс энергию в несколько килоджоулей. Согласование импедансов взрывомагнитных генераторов и виркатора, а также формирование необходимой формы электрического импульса осуществлялось с помощью электровзрывных прерывателей тока, обостряющих разрядника и емкости. Предложены модели работы взрывомагнитных генераторов и электровзрывных прерывателей, проведено численное моделирование переходных процессов в электрической цепи. В экспериментах к виркатору подведены импульсы напряжения до 600 кВ с крутизной переднего фронта ~60 нс, при этом амплитуда тока в триоде достигала 16 кА. Пиковая мощность выведенного в атмосферу СВЧ-излучения составила не менее 100 МВт, а мощность в электронном пучке - 10 ГВт.

A B S T R A C T

The experiments have been carried out to produce high power electron beam and microwave radiation with high explosive converted. The triode with virtual cathode was used in experiments under consideration. In order to convert the chemical energy of high explosive into the electrical one, two types of high voltage helical magnetic cumulative generators with flux trapping were designed: the cylindrical generators with simultaneous axial initiation of high explosive and the small-sized conical generators with gliding contact point. These generators have been producing the energy $E \sim 10$ kJ in the load. To match the impedances of the vircator and a magnetic cumulative generator, and to shape the necessary electrical impulse in the load circuit, exploding wires, gas-filled gap and sharpening capacitor have been used. The electric technic models of the magnetic cumulative generators and exploding wires have been proposed, and digital simulation of the transitional processes in the electric circuit has been carried out. In the experiments considered voltage impulses up to 600 kV and currents up to 16 kA have been supplied to the vircator, the voltage rise time being ~60 ns. A peak microwave radiation power brought out has come nothing less than 100 MW, with an electron beam power reached 10 GW.

AQ F01-11-2351

СОДЕРЖАНИЕ

I. Введение.....	3
II. Описание электрической цепи и оценки ее параметров.....	5
2.1. Электрическая схема цепи.....	5
2.2. Переключение индуктивного накопителя на силовую нагрузку.....	9
2.3. Переключение индуктивного накопителя на вакуумный диод.....	10
2.4. Оценки параметров ВИП.....	14
2.5. Требования к электрическим параметрам, вырабатываемым ВИГ.....	17
III. Модели работы ВИГ с "перехватом" магнитного потока.....	17
3.1. Электротехническая модель работы ВИГ с "перехватом" потока.....	19
3.2. Цепь без потерь.....	21
3.3. Влияние емкости в цепи запитки на параметры импульсов.....	23
3.4. Модель ВИГ с осевым инициированием.....	25
3.5. Модель ВИГ со скользящим контактом.....	30
3.6. Заметания с выборе оптимального закона изменения индуктивности.....	36
IV. Математическое моделирование процессов в электрической цепи.....	39
4.1. Электрическая схема замещения.....	39
4.2. ВИГ.....	39
4.3. Виркатор.....	40
4.4. Обостряющий разрядник.....	40
4.5. Электровзрывной прерыватель тока.....	40
4.6. Система уравнений электрической цепи.....	46
4.7. Программа расчета режимов электрической цепи.....	47
V. Описание экспериментального стенда.....	49
5.1. Состав стенда.....	49
5.2. Система измерений.....	57
VI. Экспериментальное исследование работы ВИГ с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку.....	59
6.1. ВИГ с осевым инициированием.....	59
6.2. Цилиндрические генераторы со скользящей точкой контакта.....	65
6.3. Коллические генераторы.....	71
VII. Экспериментальное исследование режимов генерации мощного СВЧ-излучения.....	78
7.1. Схема 1.....	78
7.2. Схема 2.....	81
7.3. Схема 3.....	81
7.4. Схема 4.....	83
VIII. Обсуждение результатов и выводы.....	87
ЛИТЕРАТУРА.....	91

I. Введение

Современный прогресс в разработке мощных импульсных генераторов когерентных колебаний микроволнового диапазона сделал возможным получение в лабораторных условиях интенсивных потоков СВЧ-излучения гигаваттного уровня мощностей при характерной энергии импульса в сотни джоулей [1-3]. Это открывает интересные перспективы использования таких потоков для нагрева атмосферы на конденсированные материалы и ионосферную плазму, для нагрева плазмы в термоядерных установках, для передачи электрической энергии из космоса на Землю, в радиолокации и связи, для функционального воздействия на клетки живого организма и т.д. Успешное решение этих задач связано с дальнейшим продвижением по шкале мощностей и энергий излучения, но уже сейчас это ограничивается возможностями системы электропитания СВЧ-генераторов, в качестве которых обычно используются ёмкостные накопители, являющиеся сложными, громоздкими и дорогостоящими инженерными сооружениями. В мегаджоульном диапазоне энергий реальной альтернативой ёмкостным накопителям являются взрывомагнитные генераторы (ВМГ) [4,5], использующие химическую энергию конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), которые имеют на 5-6 порядков более высокую плотность запасенной энергии. При этом, однако, возникает ряд нетривиальных проблем, выявленных несогласием масштаба характерных энергий. Дело в том, что типичный уровень удельных энерговыделений при детонации КВВ соответствует энергии связи валентных электронов и составляет величину порядка электронвольта, в то время как эффективное преобразование энергии электронного пучка в электромагнитное излучение осуществляется в релятивистском диапазоне $\varepsilon = m_e c^2 \approx 0,5$ МэВ.

В данной работе для запуска генератора когерентного СВЧ-излучателя использовались взрывомагнитные генераторы, действие которых основано на магнитной кумуляции при взрывном сжатии оболочки с магнитным потоком продуктыми детонации химического ВВ. Эти устройства характеризуются высокой плотностью генерируемой энергии $\sim 10^8$ Дж/м³, удельной мощностью

$\sim 10^{13}$ Вт/м³ с эффективностью использования химической энергии КВВ до 10% [6,7].

Источником когерентного СВЧ-излучения выбран сильноточный релятивистский генератор - виркатор на основе триода с виртуальным катодом [1], в котором энергия интенсивного релятивистского электронного пучка с К.П.Д. до 30-40% преобразуется в энергию электромагнитного поля при осцилляторном движении электронов в потенциальной яме, создаваемой реальным и виртуальным катодами. Механизмом формирования интенсивного электронного пучка является взрывная эмиссия [8], обеспечивающая на "холодных" катодах значительные (до 10^6 А/см²) плотности тока и требующая поэтому для своей реализации токов питания генератора в единицы или десятки килоампер. Важно, что при этом в виркаторе удается сформировать электронные потоки, интенсивность которых значительно превосходят предельный вакуумный ток, без громоздкой системы создания внешнего фокусирующего магнитного поля, и обеспечить рекордно высокие (до 20 ГВт [9]) мощности СВЧ-излучения при крайней простоте генерирующего устройства. Кроме того, в виркаторных системах удается регулировать частоту излучения от 0,5 ГГц до 30 ГГц, формировать диаграмму направленности излучения в телесном угле $\sim 20^\circ$, а также получать СВЧ-импульсы микросекундной длительности [10].

Вместе с тем, физические особенности генерации СВЧ-излучения в триоде предъявляют жесткие требования к системе электропитания, которая должна обеспечить импульсы напряжения >300 кВ с резким ($<10^{-7}$ сек) фронтом нарастания и импульс тока >10 кА. С этой целью были разработаны специальные высоковольтные взрывомагнитные генераторы [11,12] спиральной конструкции с осевым инициированием заряда КВВ и малогабаритные генераторы со скользящим контактом. От других ВМГ их отличает способность реализовать импульсы напряжения ~ 100 -200 кВ непосредственно на генераторе при небольшом количестве КВВ ~ 150 -600 г за счет быстрого ($\sim 5+15$ мкс) изменения большой начальной индуктивности генератора. Конструкция генератора обеспечивает на согласованной нагрузке электрический импульсы энергии ~ 50 кДж и мощностью ~ 10 ГВт.

В первых экспериментах [11] по взрывной генерации СВЧ-излучения для формирования элегрического импульса ~350 кВ и согласования импедансов ВМГ и виркатора использовались повышенный импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации ~4 и обостряющий газонаполненный разрядник. Зарегистрированная мощность излучения ($\sim 10^5$ Вт) ограничивалась недостаточной скоростью нарастания электрического импульса. Перемыкание анод-катодного промежутка ионной плазмой наступало раньше момента, ставшего критическим для мощной генерации электронных токов. Введение во вторичную цепь обостряющей ёмкости $\sim 1\cdot 10^{-3}$ нФ позволило повысить мощность излучения до 10^6 Вт при длительности ~ 700 нс.

Анализ проведенных ранее экспериментов показал, что для создания на виркаторе электрических импульсов требуемой крутизны нарастания, амплитуды и длительности необходимо использовать электровзрывной прерыватель (ЭВП). В этом случае оказывается возможным работа СВЧ-генератора с низким уровнем энергии в индуктивном накопителе (несколько килоджулей). Кроме того, в схеме питания отсутствует такой сложный элемент, как высоковольтный трансформатор.

Настоящая работа посвящена исследованию режимов генерации СВЧ-импульса, выбору конкретных устройств и их параметров для предложенной нами безтрансформаторной схемы питания виркатора.

II. Описание электрической цепи и оценка ее параметров.

2.1. Электрическая схема цепи.

Принципиальная схема электрической цепи, предлагаемая для запитки виркатора, приведена на рис. 2.1.1. Здесь ИТ - источник тока запитки. Это может быть ёмкостной источник энергии, аккумуляторная батарея или запиточный ВМП, использующий первоначальную энергию постоянных магнитов, пьезокерамики, феррокерамики. ЕМП2 с "перехватом" магнитного потока предназначен для выработки во вторичной цепи электрического импульса с заданными параметрами. РУР претворяет

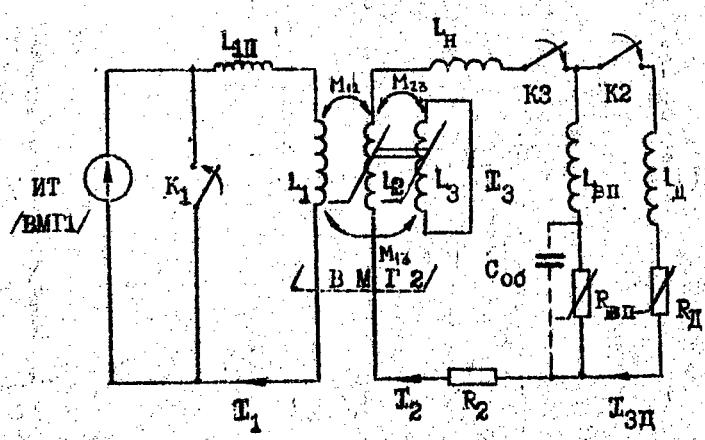


Рис. 2.1.1. Электрическая схема цепи
для запитки триода.

тремя индуктивно связанными соленоидами: спиральюми I_1 , I_2 и лайнером I_3 . Индуктивность L_{II} - первичная индуктивность первичной цепи ВМГ. Электровзрывной прерыватель тока ($R_{\text{эвп}} - L_{\text{эвп}}$), обмотка L_2 и индуктивный накопитель I_n образуют вторичную цепь. Элементы R_d и L_d моделируют виркатор - нелинейную полезную нагрузку. Ключи K_1 и K_3 - замыкатели ВМГ, K_2 - обестрашющий разрядник, $C_{\text{об}}$ - обестрашющая ёмкость с индуктивностью $L_{\text{об}}$ (не показана).

В момент достижения максимума тока запитки происходит подрыв заряда КВВ. Ключи K_1 и K_3 замыкаются, ВМГ начинает работать. Движение лайнера приводит к изменению индуктивностей L_1 , L_2 , L_3 и их взаимоиндуктивностей. Во вторичнои цепи генерируется электрический ток., а на накопительной индуктивности появляется напряжение. Параметры ЭВП подбираются таким образом, чтобы взрыв проволочек происходил при максимуме тока во вторичной цепи. При взрыве ЭВП происходит резкий подброс напряжения, разрядник K_2 пробивается и ток переключается в триод (виркатор).

Математическое моделирование процессов в электрической цепи рассмотрим в последующих главах. В этой главе остановимся на оценке параметров цепи с целью выполнения требований, предъявляемых к электрическим параметрам, вырабатываемым ВМГ.

Главным критерием здесь является получение мощности СВЧ излучения на уровне 1 ГВт. В настоящее время отсутствует хорошая модель с обратной связью, которая описывала бы зависимость параметров СВЧ-излучения от электрического импульса в триоде, поэтому будем ориентироваться на экспериментальные данные [1], в соответствии с которыми для 1 ГВт СВЧ требуется напряжение на триоде ~300-500 кВ, ток >10А, фронт нарастания импульса $\tau_f < 100$ нс и длительность импульса $\tau = 0.5 \pm 1$ мкс.

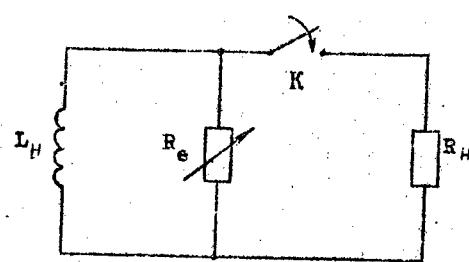


Рис.2.2.1. Эквивалентная схема подключения
омической нагрузки.

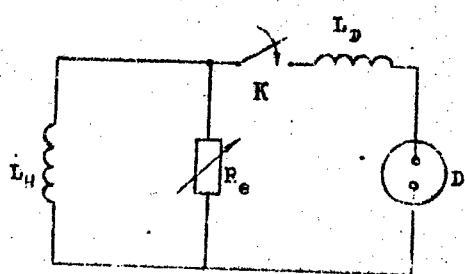


Рис.2.3.1. Эквивалентная схема подключения диода.

2.2. Переключение индуктивного накопителя на симметричную нагрузку

Для проведения оценок рассмотрим конечную стадию работы схемы рис.2.1.1. В связи с тем, что процесс электрорыва проколочек происходит достаточно быстро ($\sim 50\text{--}100$ мсек) по сравнению со временем работы ВМГ ($\sim 5\text{--}10$ мксек), в первом приближении рассмотрим упрощенную схему на рис.2.2.1. Пусть в начальный момент $t=0$ в постоянной индуктивности L_H накоплена энергия $E=L_H I_0^2/2$, где I_0 - начальный ток в левом контуре цепи. Электросопротивление ЭП начинает быстро расти от начального значения R_{e0} , соответствующего значению начала электрорыва проводников. Согласно [14], на стадии электрорыва сопротивление можно аппроксимировать простым законом $R_e=R_{e0}e^{\beta t}$, где величина параметра $\beta=10^7$ сек $^{-1}$ зависит от скорости вклада энергии. Положим также, что в начальный момент ключ К замыкается, подключая нагрузку, которую для простоты заменим активным сопротивлением R_H .

В этом случае цепь описывается системой дифференциальных уравнений:

$$L_H \frac{dI_1}{dt} + R_e I_2 = 0$$

$$R_e I_2 = R_H I_3$$

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$\text{решение которой: } I_1 = I_{10} \left[\frac{R_H + R_{e0}}{R_H + R_e} \right]^{R_H / \beta L_H}$$

При этом на нагрузке развивается напряжение

$$U_H = \frac{R_e R_H}{R_e + R_H} I_{10} \left[\frac{R_H + R_{e0}}{R_H + R_e} \right]^{R_H / \beta L_H}$$

максимальное значение которого

$$U_{\max} = R_H I_{10} \frac{\beta L_H}{(R_H + R_{eo}) (1 + R_E / \beta L_H)} \quad 2.2.1$$

достигается в момент времени

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\beta L_H}{R_{eo}} \quad 2.2.2$$

Подставив характерные величины $\beta = 5 \cdot 10^7$ сек $^{-1}$, $I_{10} \sim 5 \cdot 10^{-6}$, $R_{eo} \sim 2.5$ см, $R_H \sim 40$ ом, получим, что при токе $I_{10} \sim 15$ кА в нагрузке можно получить напряжение $U_{\max} \sim 500$ кВ со временем достижения максимума $t_{\max} \sim 100$ нс.

Для получения максимального напряжения в нагрузке важное значение имеет выбор величины индуктивности накопителяя. Как показывают имеющиеся экспериментальные данные, габариты БМГ определяются в основном его способностью вырабатывать заданную энергию, поэтому зафиксируем начальную энергию в индуктивном накопителе и максимизируем значение U_{\max} относительно величины индуктивности L_H . Найдем

$$L_{\text{нолт}} \sim 2.5 \frac{R_H}{\beta} \quad 2.2.3$$

Для характерных значений величин $I_{10} \sim 2$ мАИ, при этом для получения в нагрузке напряжения ~ 500 кВ достаточно первоначальная энергия $E_0 \sim 300$ Дж.

Таким образом, использование простых аналитических формул 2.2.1-2.2.3 позволяет оценить основные параметры электрического импульса в реальной нагрузке, используя емкостное сопротивление, а также выбрать величину индуктивной нагрузки и первоначальный запас энергии.

2.3. Переключение индуктивного накопителя на вакуумный диод

С электротехнической точки зрения вакуумный диод представляет собой переменное сопротивление, уменьшающееся со

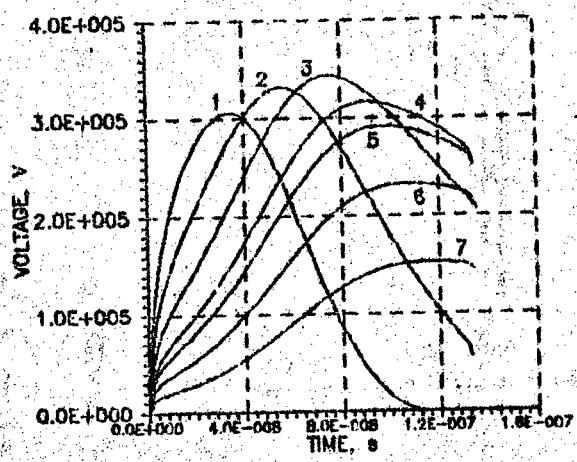


Рис. 2.3.2. Расчетные формы импульсов напряжения в диоде для различных величин индуктивности нагрузки:

1 - 0.4 мкГн, 2 - 1.0 мкГн, 3 - 2.0 мкГн,
4 - 4.0 мкГн, 5 - 10. мкГн, 6 - 20. мкГн,
7 - 40. мкГн

временем. Это вольт-амперная характеристика описывается законом Чайлд-Ленгмира :

$$I_D = \frac{P_0 U_D^{3/2}}{(1 - v_m t / d_k)^2} \quad \text{или} \quad U_D = A(t) I_D^{2/3}$$

Здесь P_0 - начальный пороганс диода,
 d_k - расстояние между анодом и катодом,
 уменьшающееся со временем,
 v_m - скорость движения фронта плазмы.

Наличие существенного нелинейного элемента в цепи значительно изменяет проведенные в предыдущем параграфе оценки, поэтому были проведены расчеты импульсов напряжения, генерируемых в диоде при включении на него с помощью ЭВИ индуктивного накопителя, по схеме, приведенной на рис.2.3.1. Эта цепь описывается уравнениями:

$$L_H \frac{dI_1}{dt} + I_D \frac{dI_3}{dt} + A(t) I_3^{2/3} = 0$$

$$L_H \frac{dI_4}{dt} + R_e I_2 = 0$$

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Численное интегрирование этой системы уравнений было проведено для $\beta=3.8 \cdot 10^7$ сек $^{-1}$. На рис. 2.3.2. приведены расчетные формы импульсов напряжения в диоде для различных величин индуктивностей нагрузки при фиксированной величине первоначально запасенной энергии $E_0=450$ Дж. Видно наличие оптимальной величины индуктивности ~2+3 мГн, когда достигается максимальные напряжения. Уменьшение индуктивности нагрузки приводит к значительному сокращению длительности импульса, что весьма нежелательно. На рис. 2.3.3 приведены максимальные значения напряжения на диоде в зависимости от величины нагрузочной индуктивности для трех фиксированных значений. Видно, что при увеличении энергии оптимальные вели-

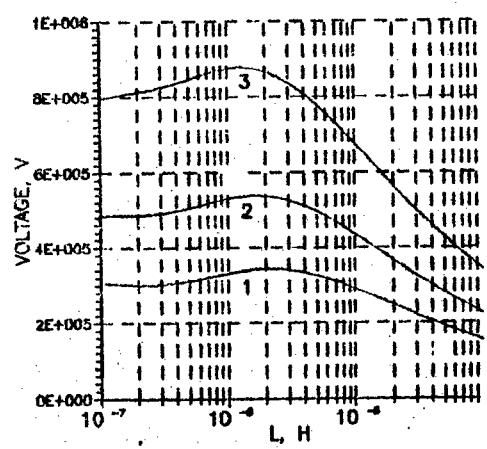


Рис. 2.3.3. Расчетные зависимости максимального напряжения в диоде от величины индуктивности нагрузки при различных энергиях:

1 - 450 кДж, 2 - 1,0 кДж, 3 - 4,5 кДж

чины индуктивности значительно уменьшаются, что связано с уменьшением эквивалентного сопротивления диода. Для достижения мегавольтного уровня напряжений необходима энергия в индуктивном накопителе ~5 кДж, а для реализации напряжения ~500 кВ достаточно $E_0 \sim 1$ кДж, что соответствует току $I_0 = 30$ кА в нагрузке $I_H = 2 \cdot 10^{-6}$ А.

2.4. Оценки параметров ЭПИ.

Проведенные в предыдущем параграфе оценки позволяют определить величину запасенной в индуктивном накопителе энергии и оптимальные значения его индуктивности. При этом предполагалось, что проролочки прерывателя достигают стадии сбоя одновременно в момент максимума тока запитки от ВМГ. В этом параграфе сделаем сценки параметров ЭПИ и выясним требования к импульсу запиточного тока. Для этого воспользуемся приближенной моделью электроэрозии 1131, в которой весь процесс делится на две стадии: стадию нагрева и стадию собственно взрыва.

Стадия нагрева включает нагрев твердого металла, плавление и нагрев жидкого металла до начальной точки взрыва. Удельное сопротивление материала $\rho = R\pi/l$ на этой стадии представляется в виде кусочно-линейной функции удельной выделенной энергии $w = W/Sl$, где S - начальное сечение проводника, l - его длина. Параметры этой зависимости приведены в табл. 5.

На стадии 'взрыва' происходит взрывное вскипание перегретого металла и резкий рост сопротивления, который можно считать экспоненциальным во времени. Инкремент нарастания сопротивления β зависит от диаметра проволочки и скорости подвода энергии:

$$\beta = \frac{V_0}{d} \cdot \exp \left(- \frac{B_1}{j_b d} \right),$$

где d - диаметр проволочки, j_b - плотность тока в начальной точке стадии взрыва, V_0 и B_1 - параметры модели, постоянные

для данного металла и окружающей среды. Величину V_c можно рассматривать как некую продольную "скорость волны потери проводимости" при электрозварке. Числовые значения этих параметров для медных проволок, взрываемых в воздухе : $v_0=2.44 \cdot 10^3$ м/с, $B_1=2.4 \cdot 10^{18}$ А 2 /м 3 . Для оценки необходимого количества проволочек служит соотношение "интеграла действия":

$$\int_0^{t_b} I^2 dt = S^2 h,$$

где $I=I(t)$ - ток ЭВП, t_b - "момент взрыва", $S=\frac{N}{4}\pi d^2$ - общее сечение ЭВП, h - "удельное действие". Величина h слабо зависит от плотности тока и в интересующем нас диапазоне можно принять для медных проволок в газе, что

$$h = (1.8 \pm 0.1) \cdot 10^{17} A^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4.$$

При использовании этой формулы наибольшие затруднения вызывает определение тока, так как обычно известны параметры электрического импульса в отсутствие ЭВП. Как показывают имеющиеся экспериментальные данные, наличие ЭВП значительно уменьшает амплитуду максимального тока в цепи $I_m \approx (0.7+0.8) \cdot I_{mo}$. Оценку интеграла можно проводить по формуле $-k I_m^2 t_b$, где k - множитель, зависящий от формы импульса тока: если она близка к четверти периода синусоиды, то $k=0.5$, если близка к треугольной, то $k=0.23$.

Для определения необходимой длины проволок можно использовать зависимость, связывающую пробивное напряжение ЭВП со скоростью ввода энергии:

$$\frac{U_p \sqrt{d}}{l} = A \exp \left(-\frac{B_2}{j_b^2 d} \right)$$

где l -длина проволок, U_p -пробивное напряжение, j_b -плотность тока в начальной точке взрыва, A и B -эмпирически определенные константы $A \approx (10 \pm 2) \cdot 10^3$ В/м $^{1/2}$, $B_2 \approx 2.2 \cdot 10^{18}$.

A^2/m^3 . Величина A зависит от величины подключаемой нагрузки: растет с ростом ее сопротивления. Наиболее неопределенная величина в этой формуле — J_b . Можно принять $J_b = (0,8+1,0)J_m$, где $J_m = I_m/S$.

Как видно из выражения для инкремента, он уменьшается с уменьшением плотности тока или с увеличением времени протекания тока по проводнику. Для получения достаточно больших значений $\beta > 10^7 \text{ с}^{-1}$ время протекания тока не должно превышать $t_b < 10 \text{ мкс}$. Чтобы показать это, примем для простоты, что $J_b = J_m$, тогда $k t_b \leq h$. Выразим отсюда J_b^2 , подставим в выражение для инкремента и умножим его части на t_b :

$$\beta t_b = \frac{V_0 t_b}{d} \cdot \exp\left(-\frac{B_1 k t_b}{h d}\right)$$

Правая часть этого равенства как функция t_b/d имеет максимум, когда выражение в скобках равно -1. Поэтому левая часть тоже ограничена:

$$\beta t_b \leq \frac{V_0 h}{B_1 k}$$

Полагая $k=0,5$ и подставив приведенные выше значения параметров, получим:

$$\beta t_b \leq 170.$$

Тогда, например, для $\beta = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, надо иметь $t_b \leq 6,5 \text{ мкс}$. При заданном времени протекания тока существует оптимальный диаметр проводника, для которого инкремент максимальен:

$$d_{\text{опт}} = \frac{B_1 k t_b}{h}$$

Этих формул достаточно для оценки параметров прерывателя. Если ток $I=30 \text{ кА}$ достигается за 7 мксек, а форма его импульса близка к треугольной, то необходимо взять $N=50$ шт проволок диаметром $d=0,05 \text{ мм}$ и длиной $l=600+800 \text{ мм}$.

Оценить энергию, необходимую для электрозвяза проводни-

ков, можно исходя из того, что при оптимальном их диаметре энергия, потребляемая при взрыве, примерно равна энергии связи $E_{\text{ЭВ}} \sim 50 \text{ Дж/мм}^3$ [14]. В нашем примере полная энергия, потребляемая прерывателем, составляет $E \sim 3 \text{ кДж}$.

2.5. Требования к электрическим параметрам, вырабатываемым БМГ

Приведенные в предыдущих параграфах оценки позволяют сформулировать требования к электрическим параметрам, вырабатываемым БМГ, для обеспечения на диоде по выбранной схеме необходимых условий для генерации СВЧ излучения $U \sim 300 \text{--} 500 \text{ кВ}$, $I > 10 \text{ кА}$, $\tau_p < 100 \text{ нс}$, $\tau = 0,5 \text{--} 1 \text{ мксек}$. Для этого БМГ должен вырабатывать на индуктивной нагрузке в несколько микротоннрии энергию $> 1 \text{ кДж}$ за время $t < 10 \text{ мксек}$. При подключении в цепь с ЭВП БМГ, последний должен обеспечить дополнительную энергию $\sim 3 \text{ кДж}$ для электровзрыва проводников. Разработанные для этих целей конструкции БМГ и принципы их действия рассмотрены в следующих главах.

III. Модели работы БМГ с "негехватом" магнитного потока.

В настоящее время физика процессов магнитной кумуляции, которая лежит в основе принципа действия БМГ, развита достаточно хорошо. Первые работы в этой области относятся к началу 50-х годов [6, 7]. Уже разработано большое количество конструкций БМГ, которые в основном предназначены для генерации сверхсильных магнитных полей (до 2500 Тл) и реализации различных уровней энергии электрического импульса (до 100 МДж). Однако в большинстве опубликованных экспериментов БМГ использовались для запитки малоиндуктивных нагрузок $\sim 1 \text{--} 100 \text{ нГн}$ с характерным временем $\sim 100 \text{ мкс}$. При таких величинах индуктивностей нагрузки был хороший коэффициент преобразования энергии, поскольку эффективность передачи энергии кВт в электрическую пропорциональна коэффициенту перестройки цепи [15]. Интерес к исследованию возможности применения

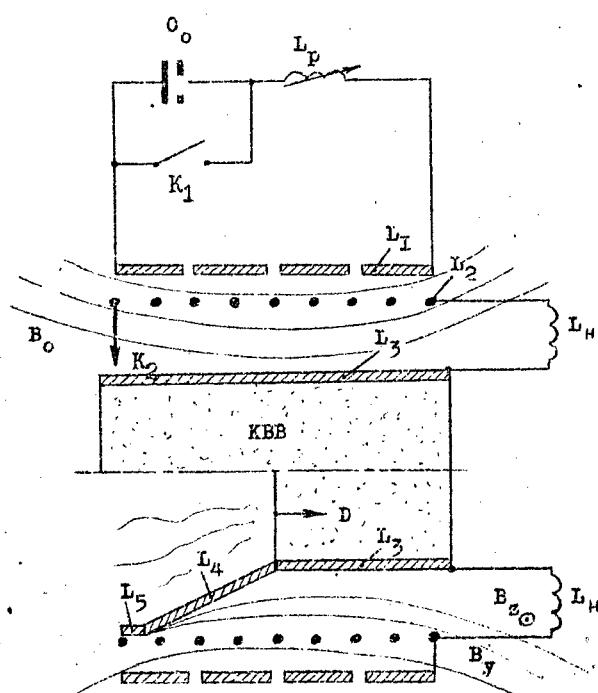


Рис.3.I.1. Схема ВМГ с "перехватом" потока.

БМГ для запитки нетрадиционных высокомощдансных нагрузок говяжется лишь в последнее время в связи с разработкой источников питания для мощных СВЧ-излучателей [4,5], рельсопрона [16], систем возбуждения лазеров [17] и других. В этих экспериментах использовались быстродействие БМГ с характерным временем работы ~10 мкс, однако их индуктивность была небольшой (<100 нГн), так что для согласования с нагрузкой применялся дополнительный элемент - импульсный трансформатор. Анализ имеющихся литературных данных показал, что в настоящее время отсутствует БМГ с требуемыми для высокомощдансных нагрузок параметрами. Это вызвало необходимость разработки таких БМГ.

БМГ с перехватом магнитного потока впервые предложен в [18,19]. В данной главе рассмотрены принципы работы БМГ с перехватом потока и приведены конструкции РМГ, удовлетворяющие требованиям запитки вирку горюч. В главе 6 описаны экспериментальные исследования процессов генерации электрического импульса в высокомощдансной нагрузке - виркаторе.

3.1. Электрическая модель работы БМГ с перехватом потока

БМГ с "перехватом" магнитного потока (рис.3.1.1) состоит из соосно расположенных внешнего запиточного соленоида L_1 , внутреннего соленоида L_2 и медного цилиндрического лайнера L_3 с зарядом КВВ внутри. Начальный поток в соленоиде L_2 создается при запитке от конденсаторной батареи C_0 или другого БМГ L_p на соленоид L_1 . В момент достижения максимума тока инициируется заряд КВВ. Продукты детонации приводят в движение медный лайнер, который замыкает вторичную цепь, "перехватывающую" магнитный поток, созданный внешним соленоидом. В случае осевого инициирования лайнер осесимметрично расширяется относительно продольной оси БМГ в виде цилиндра, а при инициировании с торца - в виде конуса, который начинает последовательно замыкать витки соленоида L_2 . В результате магнитный поток индуцируется в нагрузку L_H . видно, что величина импульса в L_H определяется лишь динамикой расширения лайнера. Чтобы определить эффективность перехвата энергии

в нагрузку, рассмотрим подробнее электротехническую модель работы ВМГ.

Для описания работы генератора требуется удачный выбор электротехнической модели и корректный расчет его индуктивности и сопротивления в зависимости от положения лайнера. Работу обычного спирального генератора представляют с помощью одноконтурной электрической схемы замещения, а индуктивность L_p вычисляют, разделяя генератор на N последовательных секций [20]. Каждая секция состоит из нескольких витков. тогда L_p будет:

$$L_p = \sum_{i=1}^N L_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N N_{ij}$$

Здесь L_i -самоиндуктивности j -й секции спирали генератора, M_{ij} - взаимоиндуктивности i -й и j -й секции спирали ($M_{ii}=0$ для $i=j$), N_{ij} -взаимоиндуктивности i -й секции спирали и j -секции медного лайнера, $i=1$ для начального момента $t=0$. В нашем случае, при наличии внешнего запиточного соленоида L_1 , в формулу для L_p войдут члены самоиндуктивностей и взаимоиндуктивностей этого соленоида. При этом следует учитывать, что запиточный соленоид L_1 остается целым (не разрушается продуктами детонации) до конца работы генератора.

Описанный метод вычисления L_p для получения зависимостей тока и напряжения в нагрузке от времени несложно реализовать на ЭВМ. Для аналитических оценок конечных значений величин электрических импульсов, выдаваемых генератором, рассмотрим упрощенную модель генератора с внешним возбуждением.

Представим расширяющийся медный лайнер как соленоид с изменяющейся индуктивностью L_2 . Тогда магнитные потоки, связанные с индуктивностями соленоидов L_1 , L_2 и L_3 , записутся в виде

$$\Phi_i = L_i I_i + \sum_j M_{ij} I_j ; \quad i,j = \{1,2,3\} \quad 3.1.1$$

здесь I_i -внимутальный ток в i -м соленоиде,

$$M_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_i L_j} \quad ; \quad i \neq j$$

k_{ij} - коэффициент индуктивной связи i -го и j -го соленоидов.

В соответствии с законами Кирхгоффа, для фундаментальных токов $I_1(t)$ в такой трехконтурной модели с индуктивными связями имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_0 + \int_0^t \frac{dI_1}{C_0} dt + \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d(L_p I_1)}{dt} + R_1 I_1 &= 0 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} + \tau_m \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 &= 0 \quad 3.1.2 \\ \frac{d\Phi_3}{dt} + R_3 I_3 &= 0 \end{aligned}$$

Здесь R_1 определяют потери магнитных потоков в соответствующих контурах, U_0 - напряжение на конденсаторах при замыкании ключа ВК (если замыкание проводится в момент максимума тока $U_0=0$), L_p - паразитная индуктивность цепи запитки или остаточная индуктивность запиточного генератора. Полагаем, что первый контур остается замкнутым до окончания работы ВМГ. В момент времени $t=0$ начальные условия определяются как $I_1=I_{10}$; $I_2=0$; $\Phi_3=0$. Последнее условие означает, что магнитный поток не проникает внутрь лайнера при запитке.

Для численного решения исходной системы уравнений необходимо задаться законом изменения индуктивностей и их взаимоиндуктивностей. К этому вопросу мы вернемся позже, а сначала рассмотрим ряд упрощенных решений.

3.2. Цепь без потерь

Если пренебречь потерями потока в контурах $R_1=0$, а емкость батареи конденсаторов считать достаточно большой $C_0 \gg t^2/L_1$ (t - время работы генератора), система уравнений 3.1.1 легко интегрируется:

$$\Phi_1 + L_p I_1 = \Phi_{10} + L_p I_{10}$$

$$\Phi_2 + L_H I_2 = \Phi_{20}$$

3.2.1

$$\Phi_3 = \Phi_{30}$$

Здесь Φ_{10} - начальные магнитные потоки в контурах. После преобразований получим:

$$I_2 = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230}) \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10}}{\left[L_H + L_2 (1 - k_{23}^2) - \frac{(k_{12} - k_{13} k_{23})^2}{1 + k_{13}^2 + L_p / L_1} \right]} * \\ * \left[I - \sqrt{\frac{L_2 / L_{20}}{(k_{120} - k_{130} k_{230}) [L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}} \right]$$

3.2.2.

$$I_1 = \frac{[L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}{[L_1 (1 - k_{13}^2) + L_p]} \cdot I_{10} - \frac{(k_{12} - k_{13} k_{23}) \sqrt{L_1 L_2}}{[L_1 (1 - k_{13}^2) + L_p]} I_2$$

Зная закон изменения $L_2(t)$ и $k_{1j}(t)$, можно найти параметры электрического импульса в контурах в зависимости от времени.

Для генераторов со скользящим контактом в конце работы при $t=t_k$ $I_2(t_k)=0$; $k_{12}(t_k)=0$; $k_{13}(t_k)=k_{13k}$. Тогда для токов имеем следующие простые выражения:

$$I_{1k} = \frac{[L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}{[L_1 (1 - k_{13k}^2) + L_p]} I_{10} \quad 3.2.3$$

$$I_{2k} = (k_{120} - k_{130} k_{230}) \frac{\sqrt{L_1 L_{20}}}{L_H} I_{10} \quad 3.2.4$$

Для систем с перехватом потока важное значение имеет коэффициент усиления магнитного потока λ . В последнем случае магнитный поток

$$\Phi_{2k} = L_H I_{2k}$$

превышает начальный магнитный поток

$$\Phi_{10} = L_1 (1 - k_{130})^2 I_{10}$$

но внешнем соленоиде в λ раз

$$\lambda = \frac{\Phi_{2k}}{\Phi_{10}} = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})}{(1 - k_{130}^2)} \sqrt{\frac{L_{20}}{L_1}} \quad 3.2.5$$

Таким образом, ВМГ с "перехватом" магнитного потока являются усилителями потока, что имеет важное значение при создании многокаскадных разрывных устройств.

Найдем коэффициент усиления энергии в идеальной системе с "перехватом" со скользящим контактом. В начальный момент в первичной цепи запасена энергия

$E_{10} = L_1 (1 - k_{130})^2 \frac{I_{10}^2}{2}$, в конечный момент в нагрузке имеем $E_{2k} = L_H I_{2k}^2 / 2$, тогда

$$\Phi_E = \frac{E_{2k}}{E_{10}} = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})^2 L_{20}}{(1 - k_{130}^2) L_H} \quad 3.2.6$$

3.3. Влияние емкости в цепи запитки на параметры импульсов

Для отладки ВМГ с перехватом потока технически удобно запитывать внешний соленоид от емкостного накопителя, и не закорачивать его после запитки. При этом возникает вопрос о правомочности применения полученных формул на конкретные многокаскадные системы. Чтобы точно оценить влияние емкости

теля, рассмотрим простейшую модель предыдущего параграфа с емкостью в цепи запитки. Преобразуя систему 3.1.2, получим

$$\frac{1}{\sigma_0} \int \int I_1 dt^2 + [L_p + L_1(1 - k_{13}^2 - \frac{(k_{12} - k_{13}k_{23})^2 L_2}{L_2(1 - k_{23}^2) + L_H})] I_1 = 3.3.1$$

$$= [L_p + L_1(1 - k_{13}^2 - \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230})(k_{12} - k_{13}k_{23})\sqrt{L_2 L_{20}}}{L_2(1 - k_{23}^2) + L_H})] \cdot I_{10}$$

$$I_2 = \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230})\sqrt{L_1 L_{20}} I_{10} - (k_{12} - k_{13}k_{23})\sqrt{L_1 L_2} I_1}{L_2(1 - k_{23}^2) + L_H} 3.3.2$$

Для дальнейших оценок положим, что индуктивность внутреннего соленоида убывает линейно со временем $L_2 = L_{20}(1-x)$:
 $x=t/\tau$, а коэффициент связи

$$k_{12} = k_{120}\sqrt{1-x}.$$

Линер разобьем на две части с коэффициентами связи

$$k_{13} = k_{130}\sqrt{1-x}, \quad k_{23} = k_{230}, \quad k_{14} = k_{11}k\sqrt{x}, \quad k_{24} = 0.$$

Тогда при $L_{20} \gg L_H$ для уравнения 3.3.1 получим

$$\frac{1}{\sigma_0} \int \int I_1 dt^2 + L_1(a - b\frac{t}{\tau}) I_1 = -bL_1 I_{10} 3.3.3$$

с начальным условием при $t=0: I_1 = I_{10}, \frac{dI_1}{dt} = \frac{b}{a\tau} I_{10}$

$$\text{тогда } a \sim 1 + L_p / L_1 - k_{130}^2 - \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230})^2}{(1 - k_{230}^2)};$$

$$\frac{b^2 k_{14}^2 - k_{130}^2}{k_{14}^2 - k_{130}^2} \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})^2}{(1 - k_{230}^2)}$$

Решение уравнения (3.3.3)

$$I_1 = I_{10} \frac{z_0 [Y_0(z_0)J_1(z) - J_0(z_0)Y_1(z)]}{z[Y_0(z_0)J_1(z_0) - J_0(z_0)Y_1(z_0)]} \quad 3.3.4$$

$$\text{где } z = 2\sqrt{\alpha(1 - \frac{bt}{at})}, \quad a = \frac{at}{b^2 L_1 C_0};$$

J_1 и Y_1 - функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, 1-го порядка. При $z, z_0 \ll 1$ получаем уже известное решение 3.2.2. В противном случае для вычисления I_1 необходимо учитывать наличие емкости в первичном контуре в согласии с формулой 3.3.4.

Важно, что конечный ток в нагрузке, как видно из выражения 3.3.2, не зависит от величины тока I_{1K} и в системе без потерь также определяется уравнением 3.2.4, однако скорость нарастания и конкретная форма импульса в нагрузке зависит от величины емкости в цепи залитки. На рис. 3.3.1. и 3.3.2. приведены расчетные величины токов в первом и во втором контурах, отнесенные к их характерным значениям при a разных. 1 - $a=10^{-2}$, 2 - $a=1$, 3 - $a=10$, 4 - $a=100$.

3.4. Модель ВМГ с осевым инициированием

Рассмотрим работу ВМГ с осевым инициированием заряда КВВ. В этом случае лайнер расширяется осесимметрично, поэтому его можно рассматривать как одновитковый соленоид с текущим радиусом r_3 . В этом случае для определения параметров электрического импульса можно пользоваться формулами 3.2.2. с $I_2 = I_{10}$. Коэффициенты связи двух катушек длины h_1 и радиуса r_1 можно определять по приближенной формуле, представляющей первые члены разложения в ряд формул из [201]:

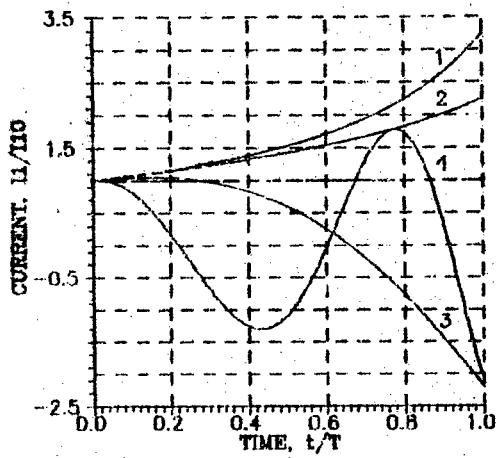


Рис. 3.3.1. Зависимость тока в первичном контуре от времени в безразмерном виде.

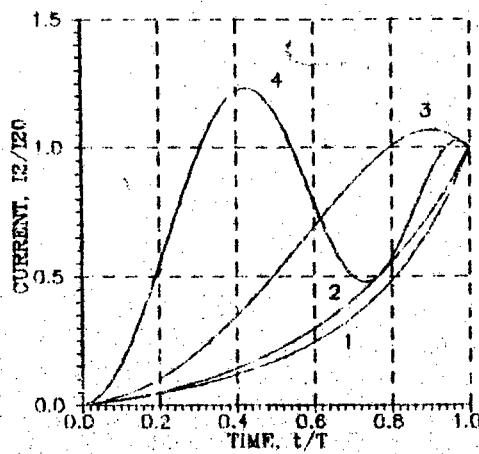


Рис. 3.3.2. Зависимость тока во вторичном контуре от времени в безразмерном виде.

$$k_{1j} = \frac{r_j}{r_1} \frac{(\sqrt{1+x_1^2} - x_1 + x_j^2/8x_1)}{\left(1 - \frac{7x_1 x_j^2}{8} + \frac{x_1^2}{2}\right) \left(1 - \frac{7x_j x_1^2}{8} + \frac{x_j^2}{2}\right)^{1/2}} \cdot \sqrt{h_j/h_1} \quad 3.4.1$$

где $x_k = r_k/h_k$; $k=1, j$; $h_j < h_1$

Зависимости скорости и радиуса лайнера от времени по данным оптической съемки можно описать формулами

$$v_L = v_0 [1 - \exp(-t/t_0)]$$

$$r_3 = r_{30} + v_0 t - v_L t_0$$

В работе [11] показано, что вследствие скин-эффекта радиусы отличаются от их геометрических размеров. Толщину скин-слоя $\delta = c \cdot \sqrt{kt}$ ($x_0^{-1} = \mu$ — коэффициент диффузии магнитного поля) надо добавить к радиусам катушек

$$r_{1,2} = r_{1,2} + \delta; \quad r_3 = r_3 + \delta$$

В условиях работы [III] наилучшее согласие с экспериментальными данными получается при $c=2.5$ и коэффициенте перестройки

$$\lambda = (r_{20}^2 - r_{30}^2) / (r_{20}^2 - r_{3k}^2) \approx 5$$

Важное значение для работы генератора с осевым инициированием имеет выбор оптимальных соотношений между индуктивностями нагрузки и генератора. Если заданы параметры нагрузки, как это имеет место в нашем случае, то начальную индуктивность генератора $L_{10}=L_{20}(I-r_{230}^2)$ при его фиксированной геометрии следует выбирать из следующих соображений. Величина

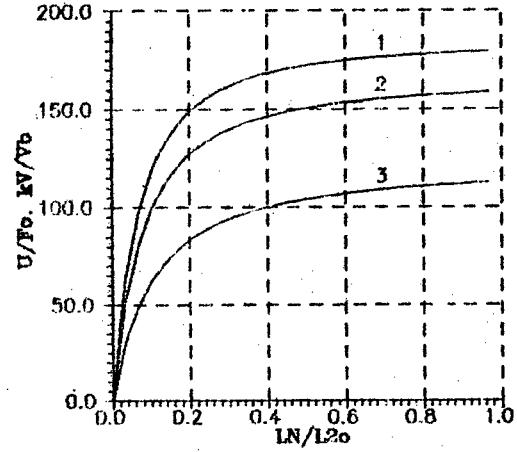


Рис. 3.4.1. Напряжение на нагрузке, отнесенное к начальному магнитному потоку, в зависимости от отношения индуктивностей

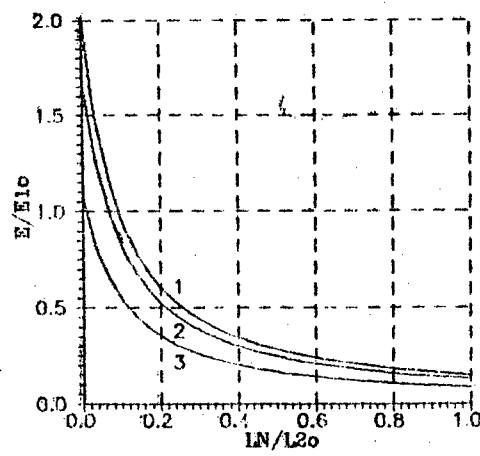


Рис. 3.4.2. Величина переданной энергии из первичного контура во вторичный в зависимости от отношения индуктивностей

тока I_2 в нагрузке будет максимальна в том случае, когда генератор вырабатывает наибольшее напряжение. Действительно, $\frac{dI_2}{dt} \Big|_{t=0} \sim L_H \cdot \frac{I_{2k}}{\tau}$. Анализ соотношений 3.2.2 показывает, что величина $f = U_{2max}/\Phi_{20}$ - функция только отношения $x = L_H/L_{20}$. На рис. 3.4.1 приведены зависимости f от x при $\lambda=5$ для трех случаев: 1 - $c=0$, 2 - $c=1$, 3 - $c=2,5$. Величина U_{2max} здесь определялась путем численного дифференцирования соотношения 3.2.2б. Видно, что в отличие от расчетов в работе [11], в генераторах с "перехватом" потока нет оптимальных условий по напряжению. Необходимо выбрать $x > 0,3$. Однако, с точки зрения эффективности передачи энергии из первого контура во второй оказывается необходимым выбирать $x=0$, что показано на рис. 3.4.2. Приведенная на рисунке зависимость $\Phi_E = E_{2k}/E_{10}$, где $E_{10} = L_{10}(1-k^2) \cdot I_{10}^2/2$ - начальная энергия; $E_{2k} = (L_H + L_{2k}) \cdot I_{2k}^2/2$, $L_{2k} = L_{20}(1-k_{23k}^2)$ - остаточная индуктивность ВМГ, показывает на чрезвычайно малые значения коэффициента передачи энергии ~10% для ВМГ с осевым инициированием и перехватом потока, что связано с его малыми значениями коэффициента перестройки. Пути повышения λ для осевого генератора обсуждались в работе [11]. Другой путь - использование генераторов со скользящей точкой контакта. Они могут обеспечить высокие значения λ , однако не способны выдерживать высокие напряжения > 100 кВ.

3.5. Модель работы ВМГ со скользящим контактом

Рассмотрим модель работы ВМГ с перехватом потока и скользящим контактом при произвольной форме лайнера. Головой лайнер из маленьких цилиндров и присвоим им индексы от 1=5 и выше. Предположим, что магнитные потоки внутри каждого цилиндра равны нулю, т.е. $\Phi_1=0$, а коэффициенты их связи между собой малы $k_{1j} \ll 0$, $i, j \geq 3$. Тогда для токов в первичной и вторичной цепях получим уравнения

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_0} \int I_1 dt + \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d}{dt}(L_p I_1) + I_1 R_1 &= 0 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} + I_{Hd} \frac{dI_2}{dt} + I_2 R_2 &= 0 \end{aligned} \quad 3.5.1$$

где

$$\Phi_1 = L_1 \left(1 - \sum_{j=3}^5 k_{1j}^2\right) I_1 + \left(k_{12} - \sum_{j=3}^5 k_{1j} k_{2j}\right) \sqrt{L_1 L_2} I_2 \quad 3.5.2$$

$$\Phi_2 = L_2 \left(1 - \sum_{j=3}^5 k_{2j}^2\right) I_2 + \left(k_{12} - \sum_{j=3}^5 k_{1j} k_{2j}\right) \sqrt{L_1 L_2} I_1 \quad 3.5.3$$

Если потерями потока в первичном контуре можно пренебречь, а емкость считать достаточно большой, ток I_2 будет описываться уравнением

$$\frac{dZ_2}{dt} + I_2 R_2 = 0 \quad 3.5.4$$

Здесь $Z_2 = (L_{2e} + I_H) I_2 + k_B \sqrt{L_1 L_2} I_{10}$,

- обмоточная индуктивность внутреннего соленоида -

$$L_{2e} = L_2 \left[1 - \sum_{j=3}^5 k_{2j}^2 - \left(k_{12} - \sum_{j=3}^5 k_{1j} k_{2j} \right)^2 / \left(1 - \sum_{j=3}^5 k_{1j}^2 + L_p / L_1 \right) \right]$$

$$k_B = \frac{\left(1 - \sum_{j=3}^5 k_{1j}^2 + L_p / L_1 \right)}{\left(1 - \sum_{j=3}^5 k_{1j}^2 + L_p / L_1 \right)} \left(k_{12} - \sum_{j=3}^5 k_{1j} k_{2j} \right)$$

Начальным условием при $t=0$ будет

$$z_{20} = (k_{120} - \sum_{j=3} k_{1j0} k_{2j0}) \cdot \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10}$$

Решение уравнения 3.5.4 -

$$z_2 = z_{20} \left[1 + \frac{1}{k_{so} \sqrt{L_{20}}} \int_0^t \frac{\tau k_s \sqrt{L_2 R_2} \exp(F(\tau))}{(L_{2e} + L_H)} d\tau \right] \exp(-F(t))$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{R_2(\tau) d\tau}{(L_{2e} + L_H)}$$

Для дальнейших расчетов необходимо задаться конкретным законом изменения индуктивности.

a) Случай $L_{2e} = L_{2eo}(1 - \beta t)$; $R_2 = \text{const}$; $k_s = k_{so} \sqrt{1 - \beta t}$

В этом случае уравнение 3.5.4 интегрируется

$$I_2 = \frac{z_{20}}{L_{2eo}(1-d)} \left[\left(\frac{L_{2e} + L_H}{L_{2eo} + L_H} \right)^{d-1} - 1 \right], \quad (d \neq 1) \quad 3.5.5$$

$$I_2 = \frac{z_{20}}{L_{2eo}} \ln \left(\frac{L_{2e} + L_H}{L_{2eo} + L_H} \right), \quad (d=1), \quad \text{где } d = R/\beta L_{2eo}.$$

В конце работы генератора в индуктивной нагрузке первоначально запасенная энергия увеличивается в

$$\phi_L = \Phi_0 \cdot \left\{ \frac{a}{(1-d)} \cdot \left[\left(\frac{a}{a+1} \right)^{d-1} - 1 \right] \right\}^2 \text{ раз.}$$

$$\text{Здесь } \Phi_0 = \frac{k_{so}^2 L_{20}}{(1-k_{130}) L_H}$$

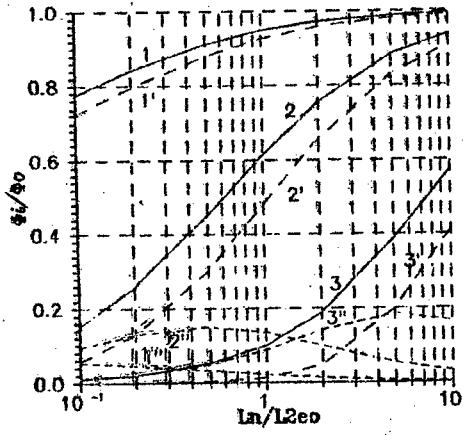


Рис 3.5.1. Коэффициент передачи энергии в нагрузку, отнесенный к его значению в цепи без потерь, в зависимости от отношения индуктивностей

- коэффициент усиления энергии в цепи без потерь, $a = I_B / I_{2eo}$:
В симметрической нагрузке при этом выделяется энергия $E_R = \int_0^t R I_2^2 dt$,
тогда коэффициент передачи энергии в симметрическую нагрузку буд-
дет равен 1.

$$\varphi_R = \varphi_0 \frac{a^2}{(1-d)^2} \cdot \left\{ 2 \cdot \left(\frac{a}{a+1} \right)^{d-1} + 2 \cdot \frac{(a+1)(d-1)^2}{a(2d-1)} - d \cdot \left[\frac{1}{1+\frac{1}{2d-1}} \cdot \left(\frac{a}{a+1} \right)^{-(d-1)} \right] \right\}, \quad d \neq 1/2 \text{ и } d \neq 1$$

$$\varphi_R = \varphi_0 \cdot 2a \left[4\sqrt{a(a+1)} - a(a+1) \left(\ln \frac{a}{a+1} + 3 \right) \right], \quad d=1/2$$

$$\varphi_R = \varphi_0 \cdot a \left[a + 2 - a \cdot \left(1 + \ln \frac{a+1}{a} \right)^2 \right], \quad d=1$$

На рис.3.5.1 приведены зависимости φ_1/φ_0 - пунктир, φ_R/φ_0 - мелкий пунктире и $(\varphi_R + \varphi_L)/\varphi$ - сплошные кривые в зависимости от параметра a для $d=0,1; 1; 10$. По этим кривым, зная параметры генератора и потери в цепи, легко оцениваются возможности ВМГ по усилению энергии в нагрузке.

Полученными аналитическими выражениями для тока в нагрузке хорошо аппроксимируются реальные экспериментальные данные (см...6.2.) путем подбора соответствующего значения R . Однако другой важный измеряемый параметр - скорость, нарастания тока - в этой модели описывается плохо.

6) Пятиконурная модель ВМГ.

При торцевом инициировании варяда КРВ лабиринт принимает форму, близкую к конической. Предположим, что после достижения внутренней спиралы лабиринт занимает ее место. Тогда лабиринт можно разбить на три части (см.рис.3.1.1). Первая часть (индекс 3) - покоящийся лабиринт радиуса r_0 , 2-я часть (индекс 4) - раскряхлился конус, и 3-я часть (индекс 5) - лабиринт,

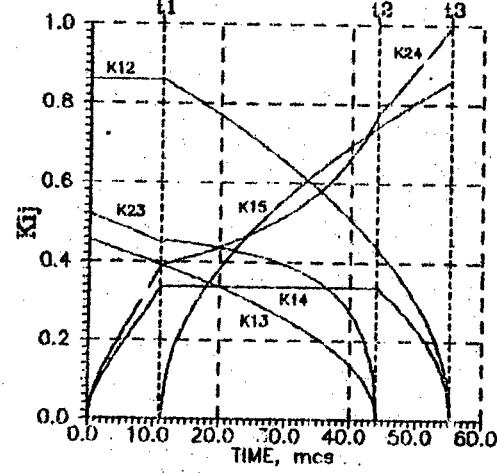


Рис. 3.5.2. Коэффициенты индуктивной связи, рассчитанные по геометрии ВМГ из эксперимента /6/ Таблицы 6.2

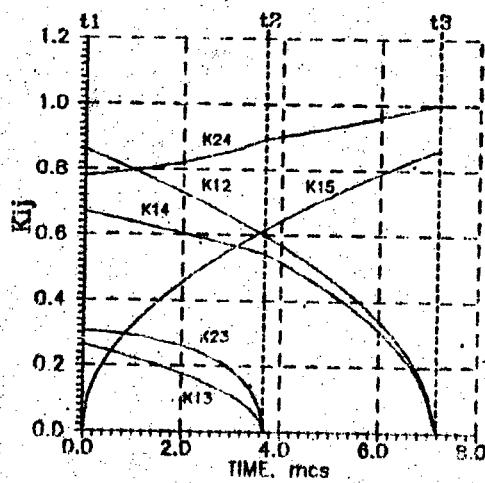


Рис. 3.5.3. Коэффициенты индуктивной связи, рассчитанные по геометрии ВМГ из эксперимента /11/ Таблицы 6.3

занимавший место внутренней спирали. Рассмотрим общий случай, когда внутренняя и внешняя спирали также конические с радиусом в начале скольжения r_1 и в конце - r_2 и с коэффициентом связи $K_{120} \neq 1$. Для оценки величины индуктивности конических спиралей будем считать, что шаг намотки постоянен и воспользуемся следующим соотношением:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi r_{\text{cp}}^2}{1} \cdot K(r_{\text{cp}}/1) \quad 3.5.6$$

где $r_{\text{cp}} = (r_i^2 + r_i r_j + r_j^2)/3$, K - поправочный множитель [20], r_i , r_j - наибольший и наименьший радиусы конуса. В этом приближении мы заменяем коническую спираль на цилиндрическую с эффективным радиусом r_{cp} . Тогда для коэффициентов связи можно пользоваться приближенной формулой 3.4.1, где под r_1 подразумеваются r_{10} . Эти соотношения справедливы для бесконечных конусов, однако их можно применять с точностью ~10% для реальных конусов, что было проверено экспериментально.

Если по результатам оптической съемки известна скорость детонации КВВ D и скорость расширения лайнера U , то траектория движения точки скольжения легко определяется аналитически:

$$x_{T_0} = Ut / (U/D - (r_1 - r_2)/1) ,$$

$$y_{T_0} = r_{10} - Ut / \left(D(r_1 - r_2) - 1 \right) ,$$

в время работы генератора $t = L/D - (r_1 - r_2)/U$.

Таким образом, в рамках предложенной модели нам известна геометрия системы в любой момент времени, а следовательно, известны все коэффициенты связи и зависимость индуктивности L_2 от времени. На рис. 3.5.2. и 3.5.3. приведены расчетные величины K_{1j} в зависимости от времени для геометрий экспериментов №6 п.6.2 и №1 п.6.3, соответственно. В начальный момент значения K_{1j} равны измеренным значениям. В

момент t_1 лайнер достигает спирали L_2 , t_2 соответствует моменту выхода детонационной волны из ВМГ и t_3 – достижению точкой скольжения конца спирали L_2 . Уравнение 3.5.4 позволяет вычислить изменение электрических параметров в цепи при работе генера "ра". Пятикоординатная модель хорошо описывает экспериментальные данные при использовании разумной функции потерь потока в генераторе.

с) Потери потока в генераторе.

В настоящей работе потери потока в генераторе учитывались в рамках модели, предложенной в работе [21], согласно которой

$$\varphi \approx -k \frac{dL_2}{dt} \dots$$

Коэффициент пропорциональности определялся путем сравнения с экспериментальными данными. Тогда в уравнении 3.5.4

$$R_2 = R_{2\text{ом}} + R_f$$

где $R_f = k \frac{dL_2}{dt}$, а скорость изменения индуктивности определяется численным дифференцированием соотношения 3.5.6; $R_{2\text{ом}}$ – чисто омическое сопротивление цепи, включая сопротивление разрывавшихся проводников.

3.6. Замечания о выборе оптимального района изменения индуктивности

При работе ВМГ на индуктивно-омическую нагрузку возникают значительные напряжения. Возможности генератора во многом определяются его способностью выдержать напряжение между витками спирали, а также между лайнером и спиралью. Электрического пробоя в указанных местах можно избежать, делая толще изоляцию витков, что приводит к значительному увеличению потерь потока. Вышеизложенное показало, что для того, чтобы генератор во скользящем контакте работал, напряжение на

нагрузке не должно превышать 5 ~100 кВ. Очевидно, что максимально возможный ток можно получить, обеспечив постоянное и максимально допустимое напряжение ε в нагрузке в течение всей работы ВМГ. Тогда уравнение 3.5.4 записается в виде:

$$L_2 e^{I_2} + k_s \sqrt{L_1 L_2} I_{10} = -\varepsilon t + Z_{20}$$

$$\frac{dI_2}{dt} + I_2 R_2 = \varepsilon \quad 3.6.1$$

Если задан закон изменения $R_2=R_2(t)$, то второе уравнение определяет закон изменения тока. Тогда из первого уравнения находим требуемый закон изменения $L_2(t)/L_{20}$. Для нахождения начальной индуктивности генератора воспользуемся следующими соображениями. Пусть будут заданы время работы генератора и энергия в первичной цепи $E_{10}=L_1(I-k_{130})I_{10}^2/2$. Тогда максимально возможный поток Z_{20} отредактируем из условия положительности правой части уравнения (3.6.1) : $Z_{20}=\varepsilon \cdot t$, а начальная индуктивность генератора определится соотношением

$$L_{20} = (\varepsilon t / k_{so})^2 / 2E_{10}$$

В качестве примера на рис. 3.6.1 приведены кривые вывода индуктивности в одном из конических генераторов (кривая 1) и расчлененная по соотношениям 3.6.1 (кривая 2) с функцией изменения сопротивления $R_2=R_{20}e^{-Bt}$, аппроксимирующей стадию нагрева ЭП. Видно, что начальную индуктивность генератора можно было взять значительно большую, а индуктивность генератора в конце работы лучше иметь более высокую.

Сделанный расчет можно рассматривать как сугубо оценочный. Для корректного определения оптимального изменения индуктивности ВМГ необходимо более совершенные модели расчета индуктивностей произвольных катушек и их геомагнитных полей с переменным шагом спирали.

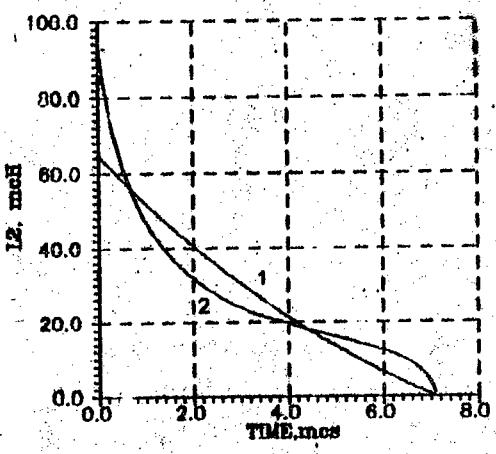


Рис. 3.8.1. Расчетная /2/ и экспериментальная /1/ зависимости изменения индуктивности

IV. Математическое моделирование процессов в электрической цепи с ВМГ.

4.1. Электрическая схема замещения цепи.

Из-за трудоемкости опытов с ВМГ экспериментальный подбор оптимальных величин индуктивностей и параметров прерывателя становится очень долгим, поэтому была создана расчетная математическая модель процессов, происходящих в электрической цепи установки. Модель описывается системой дифференциальных уравнений для схемы замещения, в которую в качестве нелинейных элементов входят ВМГ, ЭВП и виркатор.

Схема замещения электрической цепи, принятая для расчета, была приведена в главе II (рис.2.1.1). Элемент ИТ - источник тока запитки; индуктивности L_1 , L_2 и L_3 - первичная, вторичная обмотки и лайнер; L_H - нагрузка ВМГ, $L_{\text{ш}}$ - индуктивность внешней (первичной) цепи. Прерыватель и виркатор (транзистор) представлены нелинейными сопротивлениями $R_{\text{ш}}$, R_D и индуктивностями $L_{\text{ш}}$, L_D ; K_1 и K_3 - замыкатели ВМГ, K_2 - обестреливающий разрядник, $C_{\text{об}}$ - обестреливающая емкость.

Интересная для расчетов стадия процесса начинается с момента достижения максимума тока запитки в первичной цепи, когда замыкаются контакты K_1 и K_3 и начинает работу ВМГ.

Ниже описаны модели элементов цепи, система уравнений и дано краткое описание программы расчета.

4.2. Верхомагнитный генератор

ВМГ в электрической схеме замещения представлен в виде параметрических индуктивно связанных нелинейных сосредоточенных элементов цепи. В полной системе уравнений используемая модель ВМГ с осевым инициированием (см. параграф 3.4.), или пятиконтурная модель для цилиндрических и конических генераторов (см. параграф 3.5.).

4.3. Виркатор

С электротехнической точки зрения, виркатор представляет собой вакуумный диод, вольт-амперная характеристика которого описывается законом Чайлд-Ленгмира при уменьшающемся расстоянии между катодом и анодом и с учетом прозрачности сетчатого анода:

$$I_D = \frac{A_0 S_k U_D^{3/2}}{(d_k - v_{пл} t)^2} \cdot \frac{1-T^2}{1+T^2} = \frac{F_0 U_D^{3/2}}{(1-v_{пл} t/d_k)^2} \quad 4.3.1$$

где $A_0 = 2,3 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2} – постоянная, U_D – напряжение на диоде, S_k – площадь катода, d_k – длина промежутка катод-анод, $v_{пл}$ – скорость движения фронта плазмы, t – время, T – коэффициент прозрачности анода для электронов, F_0 – начальный первеанс диода. Скорость $v_{пл}$ принимается постоянной. Параметры F_0 и $v_{пл}$ определяются из эксперимента.

4.4. Обострющий разрядник

Нами использовалась модель обострющего разрядника в виде источника напряжения с экспоненциальным спадом:

$$U_a = U_{ao} \cdot \exp(-t/t_{ком}) \quad 4.4.1$$

где U_a – напряжение на разряднике, U_{ao} – напряжение пробоя разрядника, $t_{ком}$ – время коммутации.

Более сложная резистивная модель не использовалась, так как неизвестны ее параметры. Кроме того, разрядник сравнительно слабо влияет на параметры импульса.

4.5. Электровзрывной прерыватель тока.

4.5.1. Существует ряд моделей ЭВП разной сложности. Наиболее совершенные и точные в настоящее время – это магнитогидродинамические модели [14]. Однако они предполагают высо-

кие требования к ресурсам компьютеров и квалификации расчетчиков, и их применение в электротехнических расчетах не оправдано. Имеются также инженерные модели, представляющие собой более или менее удачные аппроксимации поведения сопротивления ЭВП, которые получают в результате решения обыкновенных дифференциальных уравнений. При их использовании к системе уравнений электрической цепи добавляются уравнения для ЭВП. Такие модели не всегда адекватно отражают особенности ЭВП, например, они не учитывают обратное влияние подключаемой нагрузки на сопротивление ЭВП. Однако они вполне пригодны для проведения оптимизационных расчетов.

4.5.2. Инженерная модель ЭВП, принятая в настоящей работе, разработана в НИИВН и в тезисном виде опубликована в [13]. В этой модели различаются две стадии электрического взрыва: стадия нагрева и стадия собственно взрыва. Рассчитанное удельное сопротивление представляется в виде произведения двух сомножителей:

$$r = \rho \cdot \eta,$$

один из которых - $\rho = \rho(w)$ - функция удельной введенной энергии w , а другой - η -, условно говоря, представляет часть сопротивления, связанную с расширением металла в ходе взрыва. Зависимость $\rho(w)$ имеет кусочно - линейную (ломаную) форму:

$$\rho(w) = \rho_1 + \beta_1(w - w_1), \quad 1=1,2,3,4\dots \quad 4.6.2$$

где ρ_1 и w_1 - значения ρ и w в точках излома, β_1 - угловые коэффициенты наклона на разных участках. Физически точка 1 соответствует комнатной температуре, точки 2 и 3 - началу и концу плавления, точка 4 взята как подгоночный параметр модели.

Зависимость от энергии второго сомножителя дается уравнением:

$$\eta = I \quad \text{при } w \leq w_5 \text{ (стадия нагрева)}$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\eta v(w)}{r_0} \text{ при } w > w_5 \quad 4.5.3$$

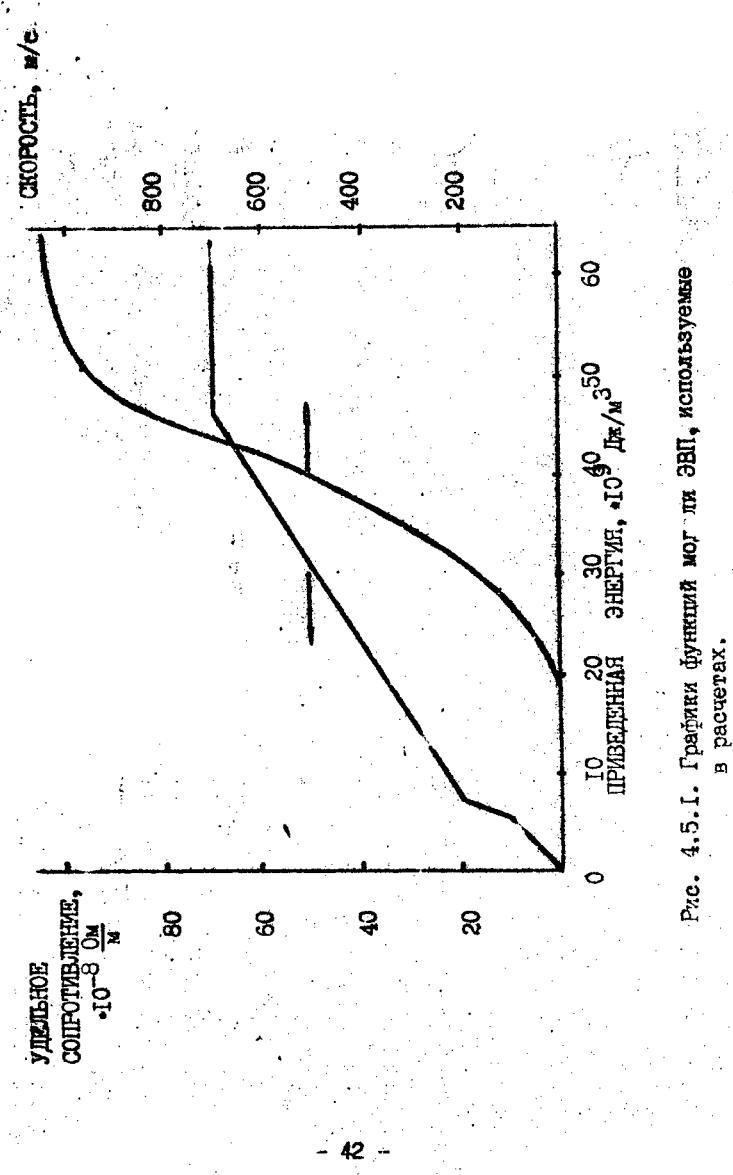


Рис. 4.5.1. Графики функций для ЭБИ, используемые в расчетах.

где r_0 - начальный радиус проводника, w_5 - точка начала стадии взрыва, $v(w)$ - функция удельной энергии, определяемая из эксперимента, условно говоря, "скорость расширения" (она имеет размерность скорости).

Установлено, что в довольно широком диапазоне по скорости нагрева функция $v(w)$ однозначна. Её можно описать выражением:

$$v(w) = \begin{cases} 0 & , \text{ при } 0 \leq w < w_5 \\ A_1(w-w_5)^2 & , \text{ при } w_5 \leq w < w_6 \\ A_2(w-w_6) & , \text{ при } w \geq w_6 \\ (w-w_6)+A_3+A_4 & \end{cases} \quad 4.5.4$$

Графики функции $\rho(w)$ и $v(w)$ приведены на рис. 4.5.1.
Значения параметров сведены в таблицу 4.1.

Проинтегрировав 4.5.3 и подставив в 4.5.1, можно получить явное выражение для сопротивления ЭВП:

$$r_{\text{ВП}}(w, t) = \frac{1}{S} \cdot \rho(w) \cdot \exp \left(\int_0^t \frac{v(w)}{r_0} dt \right) \quad 4.5.5$$

Экспоненциальный член отражает инерцию разлета продуктов взрыва и неоднозначную зависимость сопротивления от наклонной энергии при разных плотностях тока.

Кроме написанных выше уравнений и формул, нужно еще залевать дифференциальное уравнение для энергии:

$$\frac{dw}{dt} = \rho I^2 / S^2 \quad 4.5.6$$

где I - ток ЭВП, S - площадь сечения всех проволок (пачальная).

Таблица 4.1

w_1	$10^9 \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$	ρ_1	$10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	β_1	$10^{-17} \text{ Ом} \cdot \text{м}^4 \text{ Дж}$
w_1	0	ρ_1	1,7	β_1	1,88
w_2	5,0	ρ_2	11,1	β_2	5,11765
w_3	6,7	ρ_3	19,8	β_3	1,01626
w_4	46,0	ρ_4	59,74	β_4	0

w_1	$10^9 \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$	A_1
w_5	46,0	$A_1 = 0,894 \cdot 10^{-18} (\text{м} \cdot \text{с}) \cdot (\text{Дж} \cdot \text{м}^3)^2$
w_6	46,0	$A_2 = 315,4 \text{ м} \cdot \text{с}$
		$A_3 = 5,88 \cdot 10^9 \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$
		$A_4 = 804,6 \text{ м} \cdot \text{с}$

Таблица 4.2

Интервал нергии w , $\text{Дж} \cdot \text{м}^3$	a_t $\text{В} \cdot \text{м}^{1/2}$	b_t $\text{kV} \cdot \text{мм}^{1/2}$	c $\text{ГДж} \cdot \text{м}^3$
48,0	$1,931 \cdot 10^5$	6,264	140
48+120	$2,467 \cdot 10^4$	0,78	40
120	$1,767 \cdot 10^4$	0,5589	0

$$\frac{D_I}{(\text{В} \cdot \text{м}^{1/2}) \cdot (\text{Дж} \cdot \text{м}^3)^{-\beta_1}} \cdot \frac{D}{(\text{kV} \cdot \text{мм}^{1/2}) \cdot (\text{Дж} \cdot \text{мм}^3)^{-\beta_1}} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2$$

$$(\text{с} \cdot \text{м})^{-\beta_2} \quad (\text{МКС} \cdot \text{мм})^{-\beta_2}$$

$$6,9 \cdot 10^3 \quad 488,6 \quad -0,71 \quad -1,58$$

Уравнения 4.5.1 -4.5.6 описывают только рост сопротивления ЭПП. Для участка падения сопротивления, обусловленного ионизацией продуктов взрыва, у нас пока модели нет. Для определения длины проволок ЭПП в нашей модели используется критерий пробоя продуктов взрыва и вычисление их электрической прочности, что показано в следующем пункте.

4.5.3. Пробивные напряжения для ЭПП из медных проволок в воздухе приведены в [22]. Характер зависимостей оказывается разным в разных стадиях разлета продуктов, так что следует различать "кратковременную" и "длительную" электрическую прочность. Далее, для электрической прочности имеет место подобие вольт-секундных характеристик (в.-с.х.) проволок разного диаметра: для подобных условий совпадает в.-с.х. в координатах $E_p \sqrt{d}$, t/d , где E_p - электрическая прочность, $E_p = U_p / l$, U_p - пробивное напряжение, l -длина, d -диаметр проволоки. Подобные условия - это, главным образом, однородная удельная введенная энергия.

Область кратковременной прочности включает широкий диапазон напряжения и временного интервала примерно до $t/d = 6$ мс/м. Пробой происходит в поверхностном слое продуктов взрыва, до пробоя продукты обладают заметной электропроводностью. Приведенная электрическая прочность $E_p \sqrt{d}$ возрастает с увеличением энергии и быстро убывает со временем:

$$E_p \sqrt{d} = a_1 \exp\left(-\frac{b_1}{\pi} \frac{ot}{d}\right), \quad 1=1,2,3 \quad 4.5.7$$

Значения параметров a_1 ; b_1 зависят от интервала энергий π .

Величина электрической прочности в кратковременной области имеет большой разброс, и формулу надо рассматривать как ориентировочную. Строго говоря, в этом интервале вообще нельзя говорить о пробое и пробивном напряжении, а надо говорить о возрастании проводимости продуктов взрыва (см. выше).

Область "длительной" электрической прочности охватывает времена от $t/d = 15$ мс/м до $t/d = 100$ мс/м, когда электрическая прочность выходит на остаточное значение, соответствующее "бесконечной" паузе тока. В этой области длитель-

ность паузы тока хорошо воспроизводима с разбросом 5+10%. Регрессионное уравнение для вольт-секундных характеристик имеет вид:

$$E_n \sqrt{d} = D w_1^{B_1} (t/d)^{B_2} \quad 4.5.8$$

Значения параметров, входящих в формулы 4.5.7 и 4.5.8, приведены в таблице 4.2.

Значения параметров w_1 и D приведены не только в единицах СИ, но и в единицах, использованных в программе.

Что касается интервала времени $t/d=6+15$ мс/м, то в этом интервале пробой не наблюдался: он происходит раньше или позже. В модели принято, что в этом интервале электрическая прочность также описывается уравнением 4.5.8.

За начало отсчета времени в модели принят момент, когда удельное сопротивление $\rho=4 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

4.6. Система уравнений электрической цепи

Уравнения цепи, составленные по схеме рис.2.1.1 методом контурных токов, имеют вид:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = -I_1 R_1$$

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = D_2$$

$$\frac{dI_3}{dt} = (D_2 + R_{BP} I_3 + R_f I_2) / I_{BP} \quad 4.6.1$$

$$\frac{dI_4}{dt} = - (D_2 + U_a + U_D) / L_D$$

$$\frac{dU_2}{dt} = - (I_2 - I_3 - I_4) / C_{OB}$$

Здесь используются обозначения, примененные в предыдущих параграфах. Написанная система дополняется уравнениями для ЭВН, рассмотренными в п.4.5. Потоки Φ_t связаны с соответ-

свущими токами в контурах уравнениями:

$$\Phi_1 = (L_{1\text{ef}} + L_p) I_1 + k_s \sqrt{L_1 L_2} I_2$$

$$\Phi_2 = (L_{2\text{ef}} + L_H) I_2 + k_s \sqrt{L_1 L_2} I_1$$

Здесь $L_{1\text{ef}} = L_1 (1 - \sum_{j=3}^4 k_{ij}^2)$.

Начальные условия задаются для момента $t=0$, когда замыкаются ключи S_1 и S_3 и для момента $t=t_b$ пробоя разрядника S_2 . При $t=0$ — $I_3=I_4=0$; $D_2=0$; $\Phi_t=\Phi_{t0}$

$$\Phi_{t0} = (L_{1\text{ef}0} + L_{p0}) I_{10}; \Phi_{20} = k_{s0} \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10}$$

Для момента $t=t_b$: $\Phi_t(t_b-0) - \Phi_t(t_b+0)$ — условие непрерывности Φ_t и $I_4(t_b)=0$.

4.7. Программа расчета режимов электрической цепи

4.7.1. Метод и программа интегрирования дифференциальных уравнений. Мы использовали один из распространенных методов — метод Рунге-Кутта 4-го порядка с автоматическим выбором шага по заданной точности. Программа, реализующая этот метод, взята из [23] под именем DE13R. Она входит в библиотеку программ НИВЦ МГУ.

4.7.2. Программа расчета уравнений цепи под именем TOMOS разработана нами на языке Фортран-77 для персональных компьютеров типа IBM PC. Она содержит программу и ряд подпрограмм. Подпрограммы выполняют следующие функции:

TOMOS — ввод исходных данных, вывод на дискету результатов расчетов в виде зависимостей различных величин от времени.

PROCESS — готовит начальные условия для уравнений, вызывает программу интегрирования DE13R, вычисляет текущие значения токов, напряжений, мощности, энергии; контролирует пробой обостряющего разрядника и определяет момент пробоя методом квадратичной интерполяции; вызывает под-

программу определения пробивного напряжения ЭВЛ; вычисляет максимумы напряжений и токов; вычисляет длительность фронта напряжения.

DE13R -интегрирует систему уравнений .

PRAV1, PRAV2 -вычисляют значения правых членов системы уравнений.

ROV - вычисляет функции $r(w)$, $v(w)$, $r(\eta, t)$

BREAK - вычисляет пробивное напряжение ЭВЛ.

UD1ODE - вычисляет напряжение на диоде.

CCUP - вычисляет коэффициент связи.

SCINTP - вспомогательная подпрограмма квадратичной интерполяции.

MAXI -вспомогательная подпрограмма вычисления точки максимума.

Входная информация программы - это все величины, входящие в модель (35 величин). Имена входных и выходных величин определены в файле комментариев с именем COMMENT.TXT. В программе использована система единиц: мкс, ка, о¹, мГц, мм.

Программа выдает по желанию пользователя значения следующих текущих величин: Т- время; IWIRE- ток ЭВЛ, IDIOD - ток диода, UDWW - напряжение на делителе ЭВЛ, UDWD - напряжение на делителе диода.

Кроме того, выдаются значения интегральных величин и характеристических точек:

IWMAX, IDMAX -максимумы токов ЭВЛ и диода,

UDM - максимум напряжения на делителе диода,

TPR - время нарастания по 0,1-0,9 амплитуды напряжения на делителе.

POWMAX - максимальная мощность на нагрузке,

ENERGY -энергия, выделенная в диоде за время, когда напряжение на нем превосходит уровень ULEVEL.

Входная и выходная информация поменяется соответственно в файлах INPUT.DAT и RESULT.DAT.

В настоящем время разрабатывается программа графического вывода информации.

Настоящая программа работает только при ненулевых (

не слишком малых) значениях $L_{\text{ВН}}$, поэтому даже если она неизвестна, ее все равно нужно задавать.

Входную информацию можно задавать как предварительно в файл входных данных, так и в диалоговом режиме с клавиатуры.

4.7.3. Наряду с описанной выше разрабатывается программа оптимизации ТОМОС ОРТ, предназначенная для расчета оптимальных параметров мощности на нагрузке, либо максимум введенной энергии. Конечно, истинным критерием оптимальности должен служить максимальный выход излучения, но у нас нет пока модели, связывающей излучение с параметрами импульса.

Основой программы служит программа минимизации функций на ограниченном множестве методом скользящего допуска, взятая из [24] с именем FLEXI. Программа, вычисляющая значения целевой функции, остается той же -PROCESS и относящиеся к ней.

V. Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд, на котором проводились эксперименты, развернут на базе электродинамической установки ИКФЧ АН СССР. Он состоит из вакуумной металлической камеры, в которой проводился подрыв ВМГ; низковольтной батареи конденсаторов; наконечной индуктивности, электровакуумного прерывателя тока, обостряющего разрядника и обостряющей емкости, конструктивно размещенных в одном блоке; искратора, включавшего в себя вакуумный диод с проходным изолатором и системой вакуумной откачки; генератора импульсных напряжений на 500 кВ. Схематическая установка изображена на рис.5.1.

5.1. Состав стендов

5.1.1. Вакуумная камера.

Основной деталью вакуумной камеры является стальной сосуд диаметром 3 м и длиной 5 м и толщиной стенки 30 мм. С

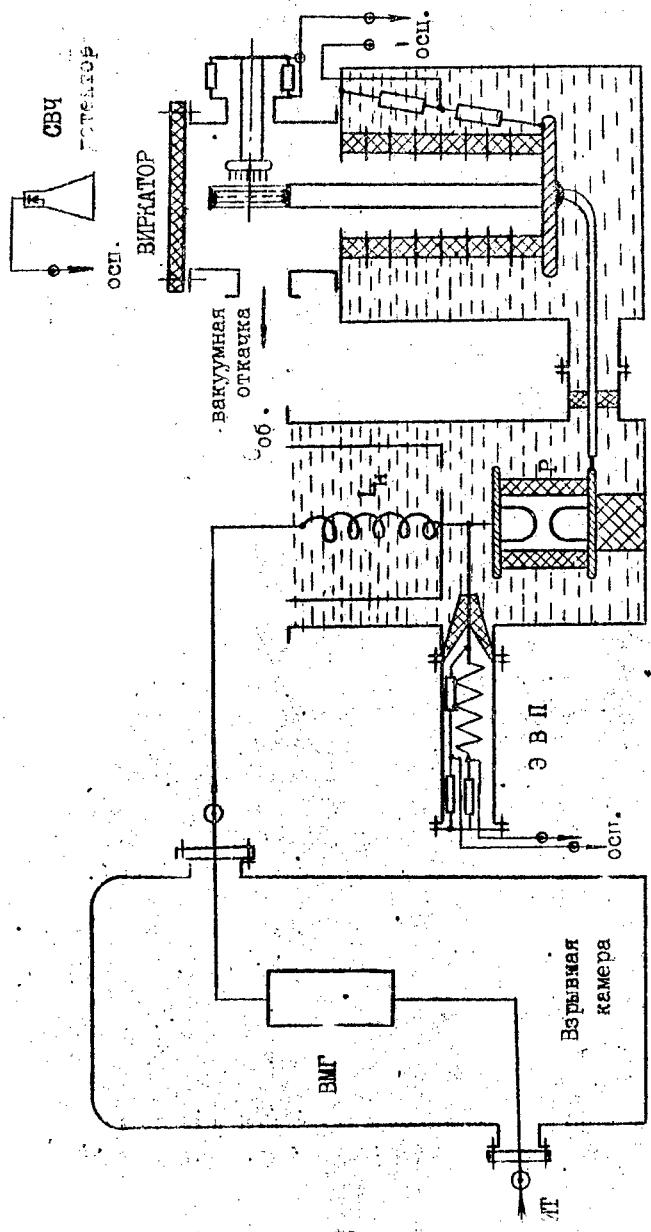


Рис. 5.1. Схема установки.

одного бока сосуд закрыт стальной крышкой, которая прижимается к нему с помощью 60 болтов и гаек М40. В крышке располагаются отверстия для входа в камеру, электрических вводов и иллюминаторов. Входное отверстие диаметром 0,7 м закрывается металлическими дверями. Внутренняя дверь состоит из двух массивных половин и предназначена для отсечки прямого воздействия ударных волн на внешнюю дверь, которая плотно прижимается к крышке с помощью шести болтов М20. Подключение системы продувки продуктов взрыва осуществляется через специальный клапан, расположенный во фланце сосуда с другого бока. Для предотвращения пробивания камеры осколками взрывомагнитных генераторов внутренняя поверхность сосуда снабжена заменяемой противосколочной защитой, состоящей из трех слоев листов сталь-алюминий-сталь толщиной по 10 мм. Энергия от низковольтной батареи конденсаторов передается внутрь камеры с помощью коаксиального малоиндуктивного электроввода, выдерживающего токи до 500 кА при напряжении до 15 кВ. Для удобства подключения ВМГ к батарее внутри камеры имеется монтажный столик. Вывод электрических импульсов осуществляется через соответствующий фланец четырьмя кабелями типа КВИ, разрушающимися в каждом взрывном эксперименте. Взрывная камера установлена в горизонтальном положении на специальной подставке, амортизированной автомобильными шинами, и заглублена на 0,5 м относительно пола. Общий вес конструкции около 25 тонн. При испытаниях камера были произведены подрывы зарядов А-IX-1 весом до 6 кг. При постоянной работе камера предназначена для экспериментов с зарядами до 2 кг тротилового эквивалента.

5.1.2. Низковольтная батарея конденсаторов.

Батарея состоит из 420 конденсаторов К-41-И7 на 5кВ-100 мкФ, разбитых на 3 секции. Они включены последовательно по две штуки, что позволяет запасать энергию ~0,5 МДж при напряжении до 10 кВ. Для зарядки батареи применяется повышающий трансформатор ТМ-25/10, питка которого осуществляется от стандартной трехфазной сети на 220 В через регулирующие латары. Использование выпрямителя на диодах КЛ20Э и

зарядных сопротивлений на резисторах ПЭВ-100 позволяет обеспечить зарядные токи до 10 А в время запитки всей батареи не более двух минут. После окончания зарядки конденсаторов цепь зарядки отключается от батареи выключателями ЕВ-5. Аварийный вывод энергии из конденсаторов осуществляется через балластные сопротивления, отдельные для каждой секции. Для защиты секций от пробоев одного из конденсаторов предусмотрены быстродействующие высоковольтные предохранители на взрывающихся медных вставках диаметром 0,8-1 мм и длиной около 10 см. В качестве коммутаторов в схеме применены игнитронные разрядники ИРТ-6 по 2 штуки на секцию. Эти разрядники позволяют производить подключение секций в заданные моменты времени на свою нагрузку. В случае коммутации всех секций на одну высокоимпедансную нагрузку используется специальная схема выравнивания потенциалов. В режиме короткого замыкания батарея позволяет получить во взрывной камере токи до 500 кА. Энергия батареи от разрядников к коаксиальному электропроводу передается жгутом кабелей ФКП. В настоящих экспериментах использовалась одна секция, емкость которой в зависимости от требований к опыту изменялась в пределах С=1+3 мФ.

5.1.3. Накопительная индуктивность.

Конструкция обеспечивает динамическую устойчивость под воздействием гидромоторных сил, возникающих при протекании больших импульсов тока. На диэлектрическую трубу с внешним диаметром 100 мм намотана медная шинка. Для изменения величины индуктивности обмотка имеет несколько высоковольтных выводов. Снаружи шинка обтягивается стеклотканью, которая пропитана эпоксидной смолой. Для снижения электрической напряженности на концах индуктивности надеваются охранные колпачки, которые одновременно являются электродами для крепления высоковольтного кабеля от ВМГ, ЗВИ, разделятельного разрядника.

5.1.4. Обогтающий разрядник.

Разрядник должен осуществлять быструю коммутацию энер-

тии, запасенной в накопительной индуктивности в необходимый момент времени на анод триода. Разрядник предстает собой газовый коммутатор на напряжение 500 кВ. Материал изоляционной камеры разрядника - оргстекло. Рабочий газ - смесь азота с эле-газом (SF_6). Материал электродов - Ст.45. Изоляционная камера выполнена из двух секций внешним диаметром 182 мм и внутренним 142 мм. Высота каждой секции 95 мм. Электроды представляют собой полусфера диаметром 60 мм. Электроды закрепляются на металлических фланцах. Фланцы и секции стягиваются капралоновыми шпильками. Изменение пробивного напряжения осуществляется изменением давления газа и расстоянием между электродами.

5.1.5. Опорный изолятор.

Изолятор выполнен из полиэтилена, имеет цилиндрическую форму длиной 240 мм. Принимая пробивную электрическую прочность по поверхности полиэтилена в трансформаторном масле ~ 100 кВ/см, его высота должна выдержать напряжение до 1 МВ. С торцов изолятора расположены металлические фланцы. С помощью нижнего фланца изолятор крепится к нижней крышке бака, а с помощью верхнего - к обостряющему разряднику.

5.1.6. Электровзрывной прерыватель тока (ЭВП).

ЭВП представляет собой набор из нескольких десятков (30+50) медных проволочек диаметром $0,05+0,06$ мм, намотанных по спирали на изоляционные диски с угловым сдвигом относительно друг друга. За основу конструкции прерывателя взят прерыватель по А.С.№719367. Диски (из винипласта) размещены на несущей винипластовой трубе с шагом, задаваемым дистанционирующими патрубками. Внутри несущей трубы размещен проволочный малоиндуктивный делитель напряжения. ЭВП-прерыватель снабжен также муントом тока, выполненным из набора малоиндуктивных сопротивлений типа ТВО. Сборка ЭВП помещена в специальную камеру, снабженную изолятором, предотвращающим пробой с высоковольтной стороны прерывателя на землю (корпус камеры). Для предотвращения пробоев вдоль прерывателя камера заполняется азотом под давлением до 4 атм. Исключение пробо-

ев вдоль прерывателя достигается также выбором соответствующей длины проволочек.

5.1.7. Обостряющая ёмкость.

Обостряющая ёмкость представляет собой коаксиальный конденсатор высотой 1,2 м, в качестве одной из обкладок которого используется цилиндрический стальной бак диаметром 470 мм для размещения разрядника и накопительной индуктивности. Высоковольтной обкладкой конденсатора служит металлическая обечайка, помещенная в бак с зазором ~25 мм от его стенок, что обеспечивало пробивное напряжение не менее 1 МВ. Обечайка размещается на верхнем фланце разрядника. Изменение величины ёмкости в трансформаторном масле составила $C_{об}=1,1 \text{ нФ}$.

5.1.8. Высоковольтный изолятор триодного генератора.

Изолятор размещен в металлическом баке цилиндрической формы, высотой 100 мм, диаметром 200 мм. Изолятор состоит из 10 секций из оргстекла, между которыми установлены градиентные металлические кольца. С целью принудительного распределения потенциала на наружной поверхности между радиантными кольцами установлены активные сопротивления типа ТВО величиной 1 кОм. Секционированный изолятор размещен между металлическими фланцами, которые стягиваются стержнями из капровона. На высоковольтном фланце укреплен анододержатель, выполненный из нержавеющей трубы, с сетчатым анодом триода на конце. Для оценки работы источника напряжения на нагрузку, представляющую собой триодный генератор, проводятся измерения тока и напряжения в генераторе. Импульс тока, протекающего через катод-анодный промежуток генератора, регистрируется на скоростном осциллографе БЛОР-4М, снимаемого с датчиков тока, выполненных в виде полса Роговского и шунта обратного тока. Для измерения ускоряющего напряжения в триодной системе используется активный делитель напряжения, подключенный к высоковольтному фланцу секционированного изолятора. С низкоомного плеча делителя импульс напряжения снимается на осциллограф БЛОР-4М.

5.1.9. Триод с виртуальным катодом.

Триодный генератор состоит из металлической вакуумной камеры, по оси которой расположен анододержатель. На конце анододержателя закреплен анод, выполненный в виде сетки. Напротив анода устанавливается многострийный взрывоэмиссионный катод. Для вывода СВЧ мощности из камеры на ее торце установлено окно из оргстекла. При разработке триода для эффективной его работы тщательно выбирались анод, катод и электродинамическая система (геометрия вакуумной камеры), соответствующие параметрам источника питания и формируемого импульса напряжения.

К а т о д . Было установлено, что длительность импульсов СВЧ излучения в триоде ограничивается временем перемыкания плазмой катод-анодного промежутка. Уменьшить скорость распространения плазмы и, следовательно, увеличить время перемыкания можно путем улучшения равномерности распределения плазмы по поверхности катода. Такой режим реализуется при многострийном катоде. Установлено также, что одним из условий достижения высокой эффективности генерации и стабилизации частоты излучения является формирование однородного по сечению электронного потока. В случае отсутствия внешнего магнитного поля наиболее однородные по сечению электронные потоки получаются тоже с помощью многострийного катода. Не менее важным является и выбор материала катода. Известно, что скорость распространения плазмы на графитовых остриях меньше, чем на остриях из стали и меди. Проведенные нами эксперименты показали, что использование графитовых остриев позволяет увеличить длительность импульса напряжения по сравнению с медными или стальными. Однако, при длительной работе графитового катода наблюдается ее значительная эрозия. При больших токах графитовые острия разрушаются и загрязняют вакуумную камеру. Это накладывает ограничения на использованием графитовых остриев в катодах триодной системы. Опыт работы с катодами показал, что при длительностях СВЧ импульсов в сотни наносекунд наиболее оптимальными являются многострийные катоды с металлическими остриями.

А и о д. В триодных системах для генерации импульсов СВЧ излучения большой длительности используются сетчатые аноды. При этом в зависимости от формы и амплитуды импульса напряжения прозрачность сетки должна иметь вполне определенное значение. Так, для напряжения до 500 кВ с фронтом импульса 20 нс и длительностью импульса 80 нс оптимальной является сетка с прозрачностью 0,7–0,75. При этом диаметр анода должен удовлетворять соотношению $D_a/D_k > 1,5$, где D_a – диаметр анода, а D_k – диаметр катода. Такое соотношение определяется увеличением эффективного диаметра электронного пучка за счет расширения эмиттирующей границы катодной плазмы в поперечном направлении. При несоблюдении указанного соотношения часть электронов пучка проходит мимо анода и не участвует в процессе генерации. На уровень мощности излучения существенное влияние оказывают однородность сетки и параллельность ее расположения относительно поверхности катода.

Вакуумная камера триода. Вакуумная камера с расположенным в ней катодом и анодом во многом определяет размеры СВЧ генератора и поэтому нахождение оптимального размера камеры – один из основных вопросов. Были проведены эксперименты по влиянию объема вакуумной камеры на процесс генерации. Объем камеры меняли от 0,03 до 0,4 м³. Дальнейшее уменьшение объема ограничивалось размерами катодного и анодного узлов, электрической прочностью. Уровень мощности излучения был одного порядка, но увеличение объема камеры приводило к изменению величины пускового тока. С увеличением объема камеры увеличивается пусковой ток, что можно объяснить ослаблением обратной связи. Было установлено, что с увеличением обратной связи эффективность генерации возрастает, а пусковой ток уменьшается.

5.1.10. Генератор импульсных напряжений.

Генератор импульсных напряжений на 500 кВ состоит из семи конденсаторов типа ИК-100-0.25У4, собранных по схеме Аркадьеве–Маркса с ёмкостью в ударе $C_y=36 \text{ нФ}$ и запасаемой энергией до 4,5 кДж. Зарядка конденсаторов осуществляется с

помощью установки УВ-50-50 до 70 кВ. В качестве коммутаторов используются воздушные шаровые разрядники, один из которых управляемый. В режиме короткого замыкания генерируются токи до 25 кА со временем достижения максимума тока около 1 мкс.

5.2. Система измерений.

Система регистрации и контроля параметров установки.
В экспериментах снимали осциллограммы для

1. тока и напряжения в цепях В_ыГ,
2. тока в цепи ЭВП и полного тока диода,
3. напряжения на ЭВП и диоде,
4. СВЧ-сигнала.

Ток через ЭВП и полный ток на диоде измерялись шунтом из резисторов ТВО-0.25. Шунт предварительно градуировался в специальном LC- контуре с малым затуханием и частоте 30 кГц.

Напряжение на ЭВП измерялось проволочным малоиндуктивным делителем; на диоде - делителем, собранным из резисторов ТВО-2. Переходные характеристики делителей снимались путем подачи импульса от специального калибровочного генератора импульсов с амплитудой 50-200 В и фронтом 2-3 нс.

Кроме того, производилась градуировка делителей на высоком напряжении (10+30 кВ). Коэффициенты делителей в обоих случаях совпадали с точностью до погрешности измерения.

Особые меры уделялись подавлению помех в измерительных линиях, для этой цели кабели прокладывались в стальных трубах или металлических оплетках. Для подавления синфазных помех применялись режекторные дроссели в виде отрезков кабелей, намотанных на ферритовые колпачки. Проводилась оценка уровня помех без работы изделия. Она не превышала 3-5% от амплитуды полезного сигнала при испытаниях установки.

Регистрация СВЧ сигнала осуществлялась с помощью лампового СВЧ-диода типа БДЭД. Мощность снималась по диаграмме направленности излучения с фиксированной длиной волны.

Ток В_ы' и его производная регистрировались двумя панов-

ии Роговского в цепях запитки и нагрузки вне взрывной камеры. В экспериментах с запиткой от спиральных ВМГ два дополнительных пояса размещались во взрывной камере в цепи с током, генерируемым запиточным ВМГ. Их тарировка осуществлялась перед каждым экспериментом.

Регистрация микросекундных сигналов осуществлялась осциллографами С9-3, наносекундных - на БЛОР-04М.

Для подрыва КВВ использовалась установка ВУ-19. Запуск датарей конденсаторов, устройств для подрыва КВВ и регистрирующих приборов осуществлялся генераторами задержанных импульсов ГЗИ-1 в заданные моменты времени.

Для избежания наводок, обусловленных случайными полями и возникающими при работе высоковольтной аппаратуры, ВМГ, ЭВП и магнитор, измерительные осциллографы помещались в специальной экранированной комнате.

VI. Экспериментальные исследования работы ВМГ с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку

Проведенные ранее исследования ВМГ с осевым инициированием [11] показали, что эти генераторы способны обеспечить требуемые параметры по току и напряжению. Однако, из-за наличия в цепи нагрузки длинного предыmpульса запитки, переключение тока ЭВП на виркатор растянуто, и генерируемые при этом напряжения не превышают 50 кВ. Чтобы обеспечить резкое переключение тока (взрыв ЭВП), были разработаны ВМГ с осевым инициированием и перехватом потока, позволяющие формировать в нагрузке требуемое значение за время ≤ 10 мкс. Эксперименты с этими ВМГ [4] показали работоспособность выбранной схемы для генерации СВЧ-излучения. Однако, низкая эффективность передачи энергии в осевых генераторах заставила вновь экспериментально изучить процессы перехвата магнитного потока сначала в простых цилиндрических системах со скользящим контактом, а затем и в конических системах, позволяющих легко регулировать начальную индуктивность ВМГ и его время работы за счет изменения угла конуса. Проведенные исследования показали высокую эффективность работы таких генераторов и их перспективность.

6.1. ВМГ с осевым инициированием

Конструкция ВМГ с осевым инициированием представляет собой (рис.6.1.1) коаксиально расположенные лайнера 1, внутренний соленоид 2 и внешний соленоид 3 длиной 200 мм. Генератор вырабатывает напряжение в нагрузке до 200 кВ, что учитывается при его изготовлении. Так, для предотвращения межвитковых пробоев и пробоя лайнер-спираль, внутренний соленоид наматывается медной шинкой со стекловолоконной изоляцией по спиральным канавкам во фторопластовой трубе 4 толщиной $A \approx 3$ мм, и заливается эпоксидным клеем. Затем наматывается несколько витков полиэтиленовой пленки 5 общей толщиной ~ 2 мм. Ширина пленки превосходит на 300 мм длину

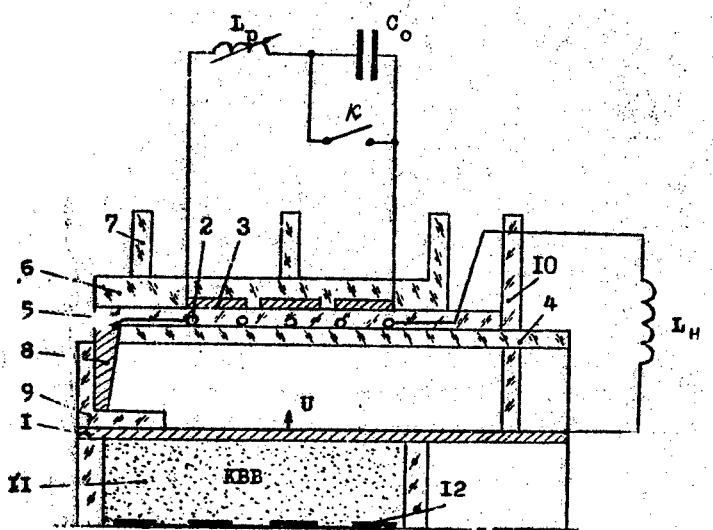
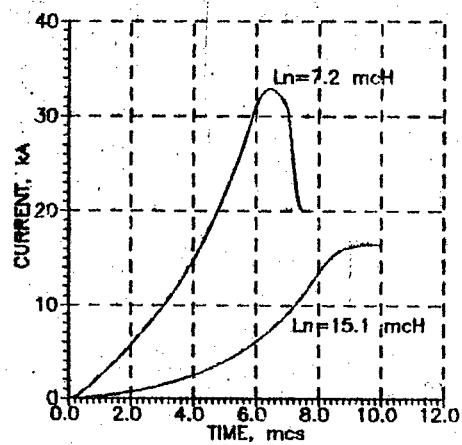


Рис.6.1.1. Схема осевого ЕМГ с "перехватом" потока.

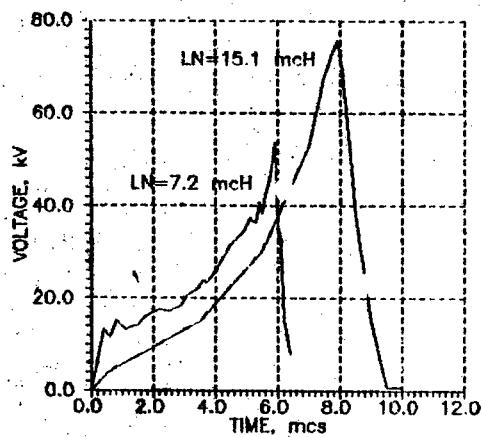
соленоидов, обеспечивая отсутствие пробоя по поверхности. Внешний соленоид закрепляется с помощью нескольких слоев стеклоленты 6, пропитанной эпоксидным компаундом. На корпус генератора, во избежании пробоя по поверхности, наклеиваются специальные ребра 7. Лайнэр изготавливается из медной трубы $D \approx 70$ мм и толщиной стенки $\approx 2,5$ мм. Труба протягивалась на оправке по внутренней поверхности, а по внешней - шлифовалась. Лайнэр центрируется по оси симметрии генератора с помощью конического медного кольца-замыкателя 8 со фторопластовой вставкой 9 и кольца 10 из оргстекла. Инициирование КВВ 11 (насыщенной гексоген) производится от взрывавшихся медных проволочек 12, которые располагаются по продольной оси лайнера. Сечение и длина проволочек рассчитаны для запитки от высоковольтного устройства ВУ-19 ($c=0,1$ мкФ, $U=50$ кВ). Такой способ инициирования был эксперимента но отложен в работе III. Нагрузка размещается вне взрывной камеры и подсоединяется к фланцам 13 взрывомагнитного генератора с помощью четырех коаксиальных кабелей 14 т. я РК-50-II-13. Генераторы перед каждым экспериментом проверялись на электрическую прочность при постоянном напряжении до 50 кВ и импульсном до 150 кВ.

Начальный магнитный поток в генераторе создается при запитке внешнего соленоида от конденсаторной батареи или от спирального взрывомагнитного генератора. В момент максимума тока происходит подрыв КВВ. Генерируется цилиндрическая расходящаяся детонационная волна, которая вызывает осесимметричный разлет лайнера. В начале разлета лайнера фторопластовая вставка 9 разрушается, вторичная цепь внутреннего соленоида и нагрузки замыкается. Магнитное поле, созданное внешним соленоидом, "перехватывается" внутренним соленоидом. Захваченное магнитное поле сжимается лайнером, а поток перераспределяется между индуктивностями генератора и нагрузки. На нагрузке вырабатывается электрический импульс.

Результаты экспериментов помещены в таблице 6.1. Типичные осциллограммы тока и напряжения, полученные в экспериментах, приведены на рис. 6.1.2. В ходе опытов варьировались индуктивности: внешнего соленоида - $L_1 = 1 \div 150$ мкГн, внутреннего

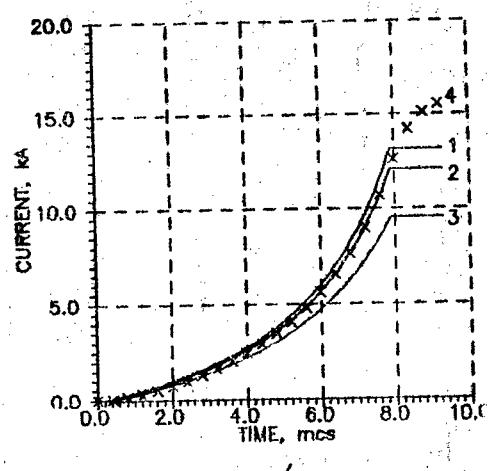


a/

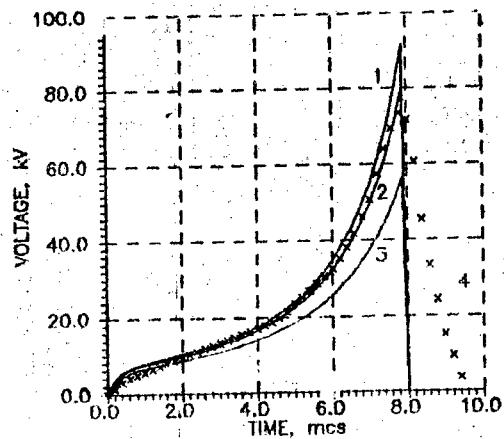


6/

Рис. 8.1.2. Типичные осциллограммы тока /а/ и напряжения /б/ в экспериментах с осевым ВМГ



a/



b/

Рис. 6.1.3. Сравнение экспериментальных данных /кривые 4/ с расчетными для тока /а/ и напряжения /б/ в нагрузке

соленоида - $L_{20}=7+35$ мкГн, нагрузки - $L_H=8+15$ мкГн, а также начальная энергия генератора - до 50 кДж. В индуктивной нагрузке получены токи до 30 кА, напряжения до 80 кВ при времени работы генератора 6-10 мкс.

Таблица 6.1

	1	2	3	4	5	6	7
$L_1, \text{мкГн}$	171.1	160.7	204.6	71.8	63.2	1.5	53.4
$L_2, \text{мкГн}$	27.4	35.8	27.5	21.0	21.2	13.0	12.9
$L_H, \text{мкГн}$	15.1	15.1	7.2	8.9	8.9	7.9	4.8
I_{10}, kA	19.6	15.4	13.6	11.1	11.0	326.1	34.3
I_{2K}, kA	15.0	16.4	24.7	8.3	16.6	19.9	21.3
U_{max}, kV	65.0	75.6	57.5	29.7	55.4	78..	70.2

На рис.6.1.3 проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетами п.3.4 при $c=0,1,2,5$. Видно, что наилучшее согласие получается при $c=1$. Отличие от работы [11], где $c=2.5$, можно объяснить отсутствием в рабочей цепи генератора запирающего импульса, так что омический разогрев спиралей и лайнера оказывается значительно меньше, приближаясь к значениям, характерным для меди при комнатной температуре $c=6$.

Проведенные эксперименты показали на малую эффективность осевых генераторов данной конструкции. Так, при энергии в первичной цепи до 50 кДж в нагрузке получено всего 2 кДж. Осевой ГМГ с израхватором потока с коэффициентом перестройки $\lambda=5$ не является усилителем электромагнитной энергии, необходимо значительно увеличить значение λ .

6.2. Цилиндрические генераторы со скользящей точкой контакта

Как известно, наиболее высокими коэффициентами усиления энергии обладают спиральные ВМГ [5,15]. Спиральные ВМГ с "перехватом" потока использовались, в основном, в многокаскадных системах для усиления магнитного потока [18,19,25]. Расчеты п. 3.6. показывают, что коэффициент усиления энергии в таких системах так же, как и в спиральных, зависит от коэффициента перестройки цепи. Однако он несколько ниже, чем в спиральных, из величины, определяемую коэффициентами связи. Для исследования процессов усиления энергии в системах с перехватом потока была предпринята специальная серия экспериментов с простыми цилиндрическими генераторами.

Цилиндрический ВМГ с перехватом потока (рис.6.2.1) состоит из сосиско расположенных внешнего запиточного соленоида L_1 , внутреннего соленоида L_2 и медного лайнера L_3 с зарядом КВВ внутри. Соленоид L_2 изготавливается из медного провода марки ПЭВ-2, который укладывался равномерно в один заход на длине 30+300 мм в канавки, прорезанные в полиэтиленовой или фторопластовой трубе 80+100 мм. Толщина стенки трубы не превышала 0,2 мм. Свободу соленоида наносился эпоксидный компаунд и наматывался слой фторопластовой ленты, на которой закреплялся втулочный соленоид. Вся сборка стягивалась затем стеклолентой, пропитанной эпоксидным компаундом. В качестве лайнера использовались медные трубы 50 мм и толщиной стенки 3 мм. Перед экспериментом измерялись индуктивности соленоидов, определялись их коэффициенты связи $K_{i,j}$ и сравнивались с расчетными величинами. Запитка генератора осуществлялась от батареи конденсаторов на напряжение до 10 кВ и емкостью до 3 мФ. В момент достижения максимума тока инициируется заряд КВВ. Продукты детонации расширяют медный лайнер, который замыкает ключ ВК, а затем последовательно витки спирали внутреннего соленоида, витки которых захватывают магнитный поток в нагрузку L_H и генерируя в ней ток. Индуктивности L_1 и L_2 образуют динамический трансформатор, во вторичной цепи которого при замыкании ключа ВК захватывается магнитный поток.

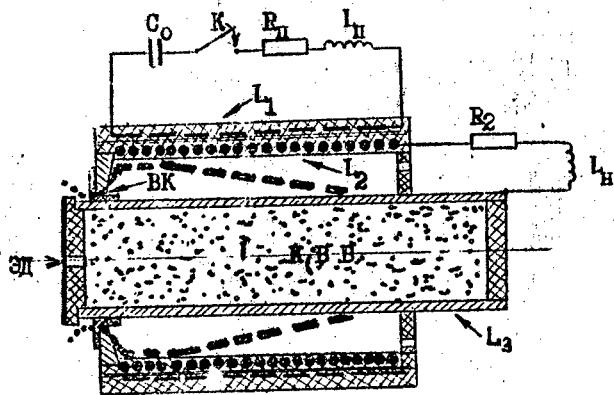


Рис. 6.2.1 Схема цилиндрического ВМГ
с "перехватом" потока.

Результаты проведенных экспериментов помещены в таблице 6.2. В экспериментах варьировались индуктивности соленоидов и за jakiочные токи. Начальный магнитный поток Φ_{10} составлял 0.1+0.4 Вс. В высокомагнитной нагрузке получены токи $I_{2K}=2+22$ кА, а максимальное усиление магнитного потока было $\eta=6.1$.

Таблица 6.2

	1	2	3	4	5	6	7
$L_1, \mu\text{H}$	25.0	31.0	14.0	10.9	12.3	11.2	1.64
$L_2, \mu\text{H}$	247	270	250	166	153	158,6	154
$L_H, \mu\text{H}$	50.8	42.5	42.6	44.7	63.0	48.8	44.5
I_{10}, kA	6.4	6.1	8.6	43.7	18.2	46.1	31.2
I_{1K}, kA	11.5	27.15	25.4	54.5	29.1	66.8	31.2
I_{2K}, kA	2.32	6.8	4.8	13.4	7.73	22.2	5.52
E_2	0.9	0.85	0.79	0.71	0.73	0.79	0.71
$\Phi_{расч}$	2.8	2.5	3.34	2.8	2.67	2.97	6.88
$\Phi_{экспер}$	1.26	2.14	2.88	1.54	2.26	2.63	6.1
η	0.45	0.86	0.86	0.55	0.85	0.88	0.89

На рис.6.2.2-6.2.4 приведен характерный вид токов в цепи внешнего соленоида и в цепи нагрузки, а также напряжение на нагрузке, для эксперимента №6. Ток в нагрузке быстро нарастает от нулевого значения до максимального при этом напряжение на нагрузке достигает 50 кВ. На рисунках приведены также их расчетные значения по модели п.3.. Видно хорошее согласие с экспериментом.

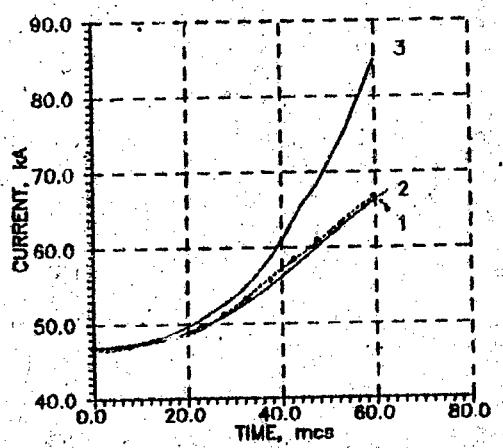


Рис. 6.2.2. Сравнение экспериментальных и расчетных величин тока в первичной цепи для цилиндрического ВЛ.

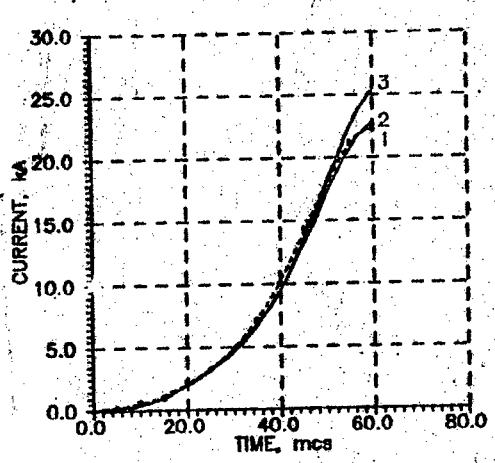


Рис. 6.2.3. Сравнение экспериментальных и расчетных величин тока во вторичной цепи для цилиндрического ВМГ

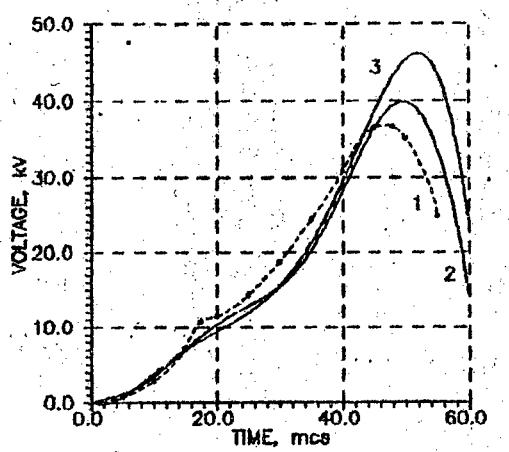


Рис. 6.2.4. Сравнение экспериментальных и расчетных величин напряжения в нагрузке для цилиндрического ВМГ

6.3. Конические генераторы

Время работы цилиндрических генераторов с торцевым иницированием определяется длиной спирали. Если требуется время работы ≈ 10 мкс, и нужны соленоиды с большой индуктивностью (для получения высоких значений коэффициента усиления энергии), то возникают сложности при намотке коротких высокомагнитных спиралей. Так, во-первых, величина минимального шага намотки (для избежания перемыкания витков и устранения перескока скользящей точки контакта) должна быть больше характерных неоднородностей при разлете лайнера. Во-вторых, эффективное сечение провода должно обеспечивать отсутствие его омического разогрева генерируемым током. В-третьих, изоляция провода должна выдерживать межвитковое напряжение, а также напряжение, возникающее между лайнером и спиралью.

Более выгодными в этом отношении представляются конические генераторы, в которых образующие соленоидов расположены под углом к оси лайнера. В этом случае заданное время работы ВМГ при известной его длине определяет выбор соответствующих диаметров при вершине и основании конуса.

В целом конструкция конического генератора мало отличается от цилиндрического (см. рис. 6.3.1.). Так как возникающие в таком генераторе напряжения выше, для провода использовалась фторопластовая изоляция толщиной 0,2 мм, которая увеличивалась до 0,5 мм в конце генератора. Для обеспечения более маленьких времен работы генератора был убран также специальный замыкатель, так что вторичная цепь начинала работать при непосредственном достижении лайнером спирали. Длина соленоида составляла 80-100 мм, больший диаметр конуса - $r_1=104$ мм, меньший менялся в диапазоне $D=60-90$ мм.

Результаты экспериментов приведены в таблице 6.3. Отладка ВМГ осуществлялась на нагрузку $L_H=4.75$ мГн. В ходе опытов менялись диаметры, длины и углы конусов токонесущих катушек, их индуктивности, межвитковая изоляция,

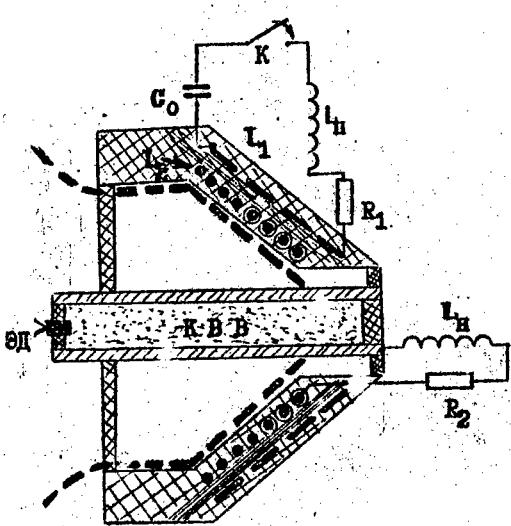


Рис. 6.3.1. Схема конического ВМГ
с "перевалом" потока.

запиточный ток. В нагрузке получены токи до 36 кА при энергии ~3 кДж, коэффициент усиления энергии ~1.3. Время работы ВМГ изменялось в диапазоне от 6 до 11 мс.

Таблица 6.3

№	$I_2, \text{мкГн}$	$E_0, \text{кДж}$	I_{\max}, kA	$E_{\max}, \text{кДж}$	$t, \text{мс}$		
						индуктивность ВМГ	начальный ток в нагрузке
1.	26.6	1.3	9.6	0.21	4.4		
2.	52.0	2.5	18.1	0.78	9.0		
3.	52.1	0.7	6.9	0.11	7.2		
4.	52.0	2.6	8.2	0.16	10.9		
5.	43.2	2.4	21.8	1.13	6.5		
6.	49.7	4.2	19.2	0.88	9.8		
7.	68.0	2.2	32.9	2.57	7.3		
8.	68.0	2.4	35.0	2.90	9.2		
9.	77.2	1.7	14.2	0.48	7.3		
10.	222.6	0.9	17.9	0.76	11.3		
11.	64.7	2.5	29.2	2.03	7.1		

Типичный ход экспериментальных кривых тока и его производной во внешнем соленоиде, тока и напряжения в нагрузке приведен на рис.6.3.2-6.3.5. Там же приведены расчетные кривые по модели п.3.7. Видно их удовлетворительное согласие, что позволило использовать эти модели для выборов параметров ВМГ в экспериментах с ЭВП и виркатором.

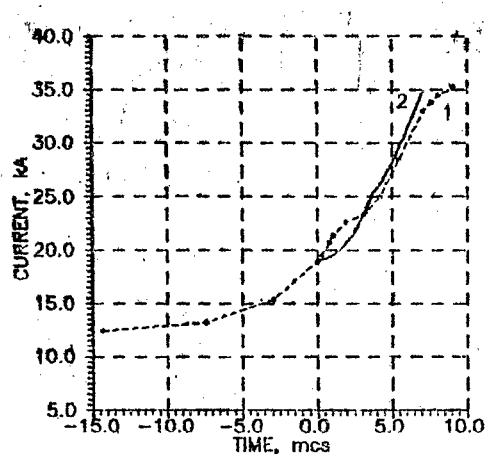


Рис. 6.3.2. Расчёчная и экспериментальная зависимости тока в первичной цепи для конического ВМГ

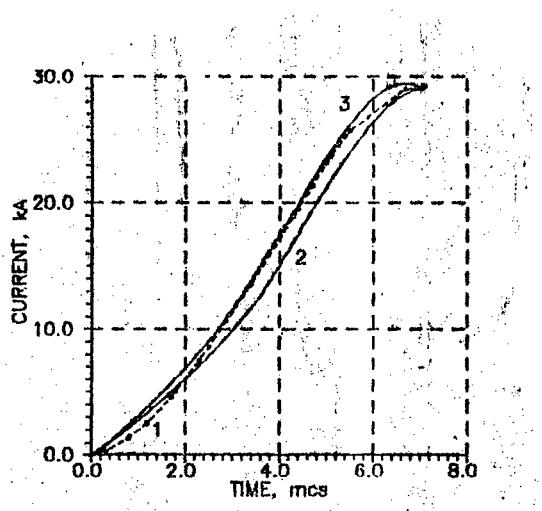


Рис 8.3.3. Расчетные и экспериментальная зависимости тока во вторичной цепи для конического ВМГ

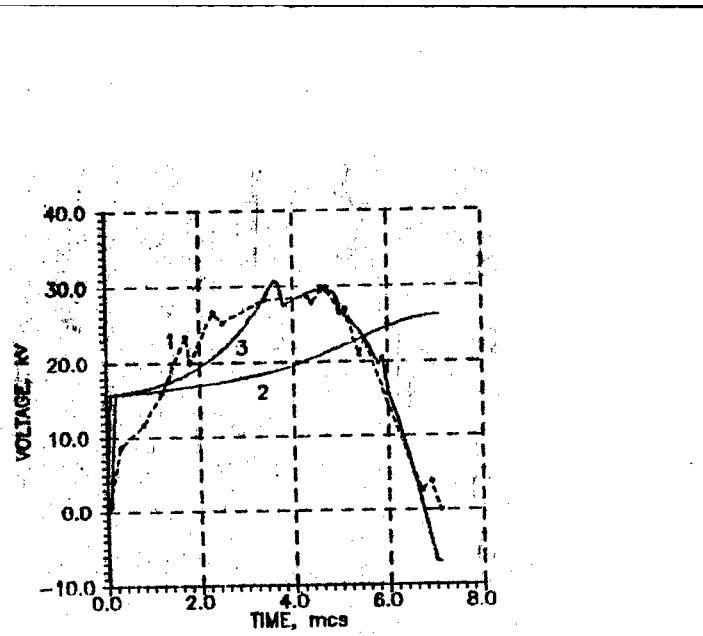


Рис. 6.3.4. Расчетные и экспериментальная зависимости напряжения в нагрузке для конического ВМГ

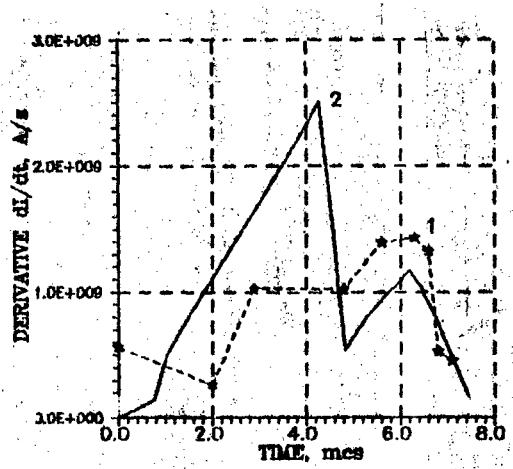


Рис. 6.3.5. Расчетная и экспериментальная зависимости производной тока в первичной цепи конического ВМТ

VII. Экспериментальное исследование режимов генерации мощного СВЧ-излучения

Были проведены экспериментальные исследования работоспособности предложенной схемы, ее возможности по формированию импульса напряжения с требуемыми характеристиками фронта, длительности, а также по генерации СВЧ-излучения. В ходе экспериментов оптимизировались параметры ЭВП, накопительной индуктивности, катода, величины промежутка катод-анод и другие параметры.

Для более полного понимания условий генерации СВЧ-колебаний в триоде были экспериментально изучены, а затем проанализированы схемы:

1. ГИН, разделятельный разрядник, триод;
2. ГИН, накопительная индуктивность, ЭВП, разрядник, триод;
3. ГИН, накопительная индуктивность, ЭВП, обостряющая ёмкость, разрядник, триод;
4. ЕМГ, накопительная индуктивность, ЭВП, разрядник, триод.

7.1. Схема I. ГИН - разделятельный разрядник - триод

Эксперименты по этой схеме проводились при напряжении на Г.И.е $U_{GIN}=250$ кВ, пробивное напряжение в разряднике $U_n=100$ кВ. На рис.7.1.1 представлены осциллограммы импульсов напряжения в катод-анодном промежутке триода, импульс тока в цепи ГИН-анод-катод, импульс СВЧ излучения. При напряжении в триоде $U=168$ кВ была получена мощность излучения на уровне 10 МВт.

Процесс генерации начинается при пусковом токе на уровне 7 кА через 220-240 нс после подачи напряжения на катод-анодный промежуток. За такой промежуток времени происходит заполнение плазмой катод-анодного промежутка. Малый уровень мощности в данном эксперименте объясняется низким уровнем

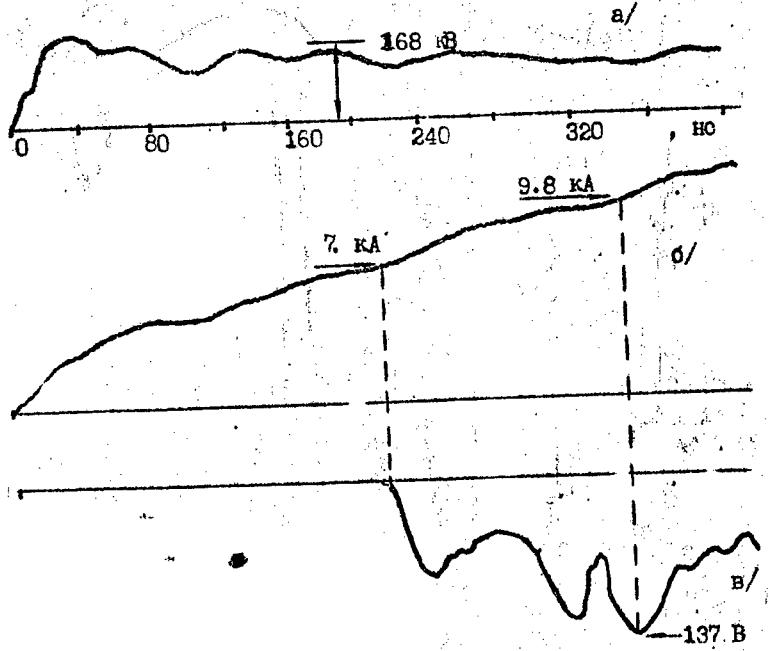


Рис. 7.1.1. Осциллограммы импульсов
напряжения /а/, тока /б/,
мощности СВЧ-излучения /в/.

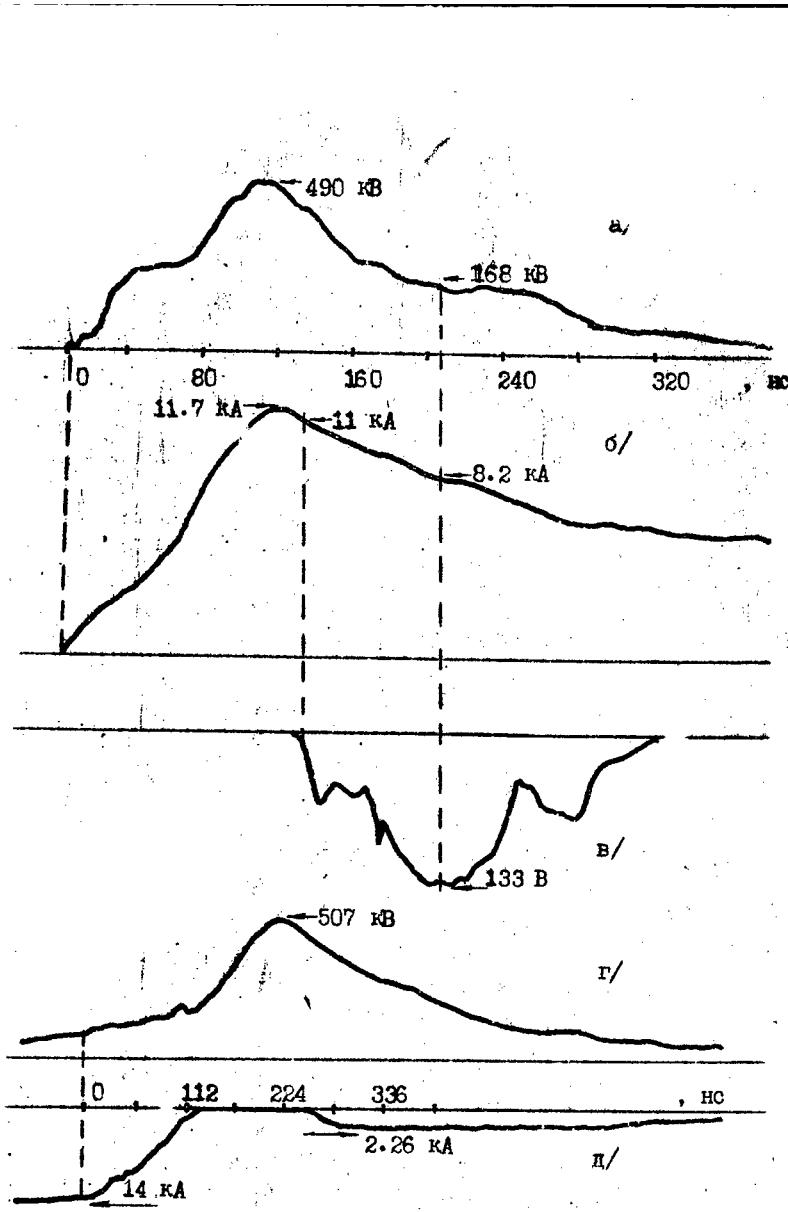


Рис. 7.2.1. Осциллограммы импульсов напряжения /а/, тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/, а также напряжения ЭВП /г/, тока ЭВП /д/.

напряжения, заполнением плавмой промежутка в момент генерации СВЧ излучения.

7.2. Схема 2. ГИИ - накопительная индуктивность - ЭИИ - разделительный разрядник - триод

Эксперименты проводились при напряжении ГИИ $U_{ГИИ} = 350$ кВ, пробивное напряжение в разряднике $U_n = 100$ кВ, величина накопительной индуктивности $L_p = 2+12 \text{ мкГн}$, диаметр проволоки ЭИИ 0.05 мм, длина проводника 550, число проводников 30. На рис. 7.2.1 представлены осциллограммы регистрируемых импульсов. Из осциллограмм видно, что при одном и том же напряжении на выходе ГИИ $-U_{ГИИ}$ за счет накопительной индуктивности и ЭИИ напряжение на катод-анодном промежутке увеличивалось в 3 раза. Фронт импульса напряжения составлял 60 нс. Амплитуда тока достигла 11,7 кА. Однако мощность генерации в этом случае не превышала 100 МВт. Генерация начинается в момент времени, когда ток достигает максимального значения (11,7 кА), что значительно превышает значение пускового тока (7 кА), и протекает на спаде импульсов напряжения и тока.

7.3. Схема 3. ГИИ - накопительная индуктивность - ЭИИ - обостряющая ёмкость - разделительный разрядник - триод

Эксперименты проводились при напряжении ГИИ $U_{ГИИ} = 380$ кВ, пробивное напряжение на разряднике $U_n = 370$ кВ, величина накопительной индуктивности $I + 8 \text{ мкГн}$, диаметр проволоки ЭИИ 0.05 мм, длина проводника 550, число проводников 30. На рис. 7.3.1 представлены осциллограммы регистрируемых импульсов. Видно, что за счет обостряющей ёмкости появляется пик напряжения ~750 кВ с фронтом нарастания ~20 нс. Амплитуда тока достигает 11 кА. Однако мощность генерации СВЧ-излучения и момент ее появления существенно не изменяются.

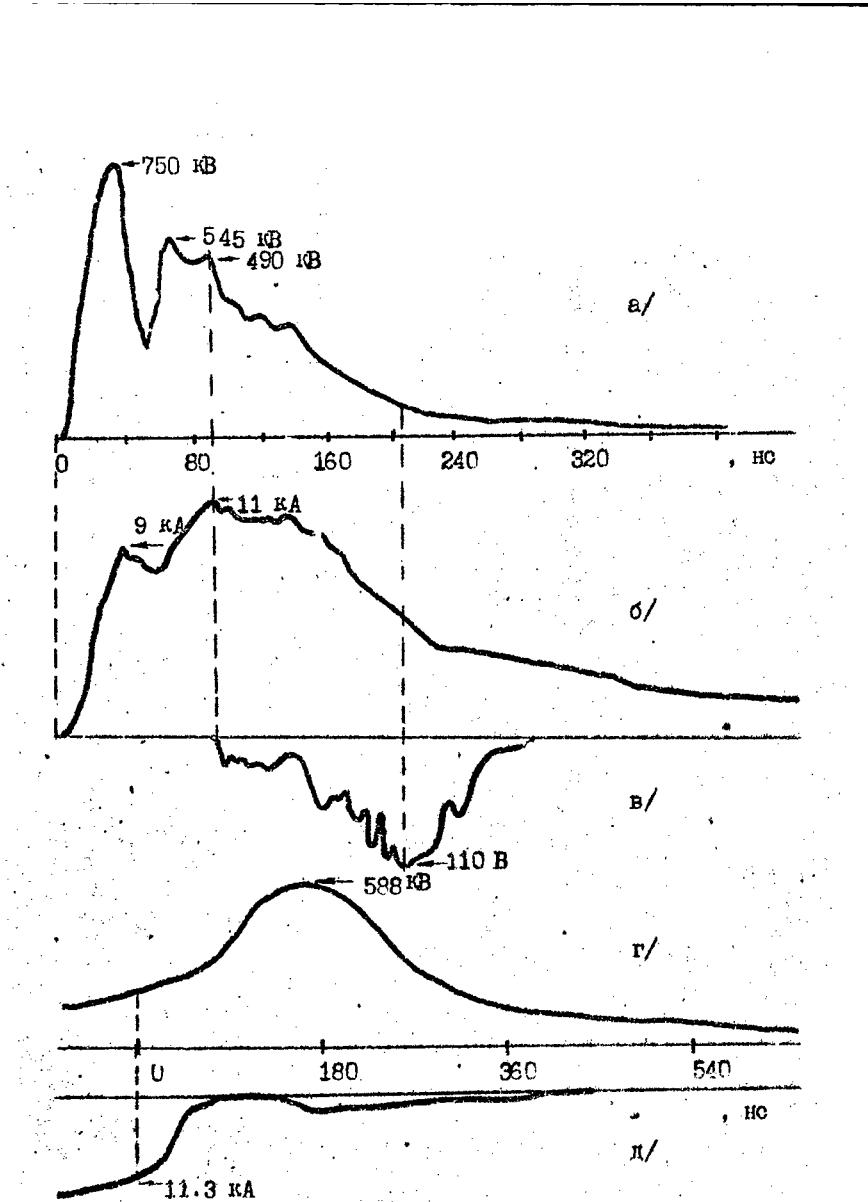


Рис. 7.3.1. Осциллограммы импульсов напряжения /а/, тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/, а также напряжения ЭВЛ /г/ и тока ЭВЛ /д/.

7.4. Схема 4. ВМГ - накопительная индуктивность - ЭВП -
разделительный разрядник - триод

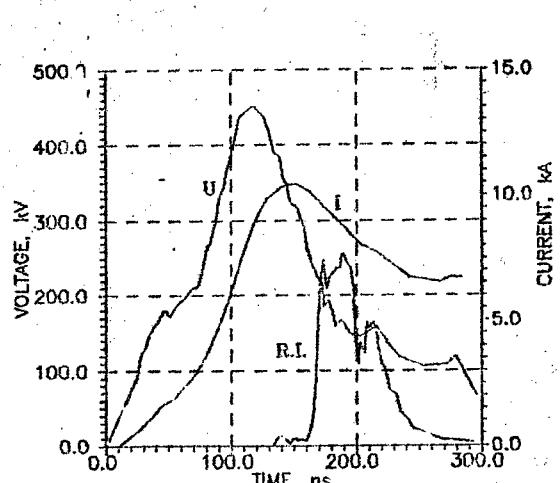
Эксперименты проводились на разработанных нами спиральных ВМГ с перехватом потока двух типов: с осевым ионизированием и со скользящим контактом. Параметры экспериментов

даны в таблице 7.1. Эксперименты с индексом 0 относятся к осевым генераторам, С-цилиндрическим, и D-коническим. В эксперименте D11, использовались два конических ВМГ, соединенных последовательно. В экспериментах с осевыми генераторами, обозначенными звездочкой, для запитки использовались спиральные генераторы с энергией ~60 кДж. В ходе экспериментов изменялись также энергия запитки ВМГ, величина накопительной индуктивности и параметры ЭВП. На рис. 7.4.1 - 7.4.2 представлены осциллограммы зарегистрированных импульсов на триоде и ЭВП в экспериментах 018 и D8. В опыте D8 был сформирован импульс напряжения амплитудой 600 кВ с фронтом нарастания ~60 нс, при этом амплитуда тока в виртаторе достигала 15.5 кА, а мощность электронного пучка - ~10 ГВт. Однако, как и в схемах 2-3, наблюдалось запаздывание начала генерации. Генерация происходила на спаде импульсов напряжения и тока, а ее начало соответствует тому, предшествующему пусковое значение. Полученная пиковая мощность излучения составила не менее 100 МВт.

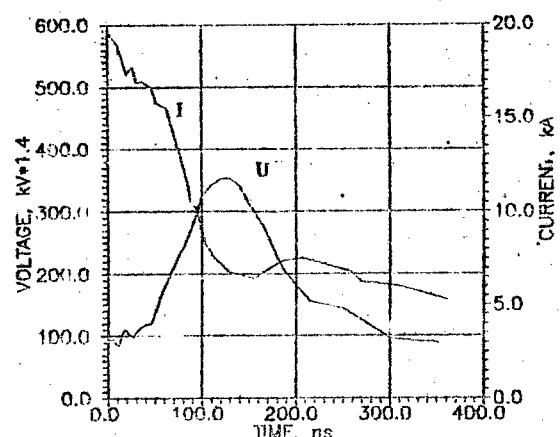
Таблица 7.1

НН ВО, кДж I_{max}, кА Еи, кДж ЭВП U, кВ I, кА N, с.с.
начальная ток энергия L(мм)- напр. ток мощность
энергия ВМГ в инд. -N на триоде триода излучения

$L_H = 8.9 \text{ мкГн}$						
04.	28.8	16.2	1.2	540-28	205	3.8
05.	32.0	18.0	1.4	470-32	225	7.4
06.	54.0	13.1	0.8	780-46	130	1.5
07.	37.0	13.2	0.8	700-40	155	1.7
08.	27.0	16.4	1.2	540-52	175	1.8
09.	28.0	16.4	1.2	470-32	270	4.3
010.	27.3	15.2	1.0	540-32	265	6.4
011.	27.0	16.6	1.2	470-27	320	6.7
012.	27.2	14.8	1.0	540-28	210	3.2
$L_H = 7.9 \text{ мкГн}$						
018*	53.1	19.9	1.6	620-42	450	11.6
019*	63.0	21.1	1.8	870-54	170	4.2
020*	60.2	23.6	2.2	780-50	250	5.8
D11.	3.0	24.0	2.2	620-50	450	10.9
$L_H = 4.8 \text{ мкГн}$						
022.	16.9	20.7	1.0	720-44	130	3.0
023.	22.0	23.0	1.3	720-44	270	7.5
024.	31.0	22.4	1.2	720-48	130	2.0
025.	29.6	21.4	1.1	620-44	140	3.0
02.	5.0	15.4	0.6	650-44	200	6.5
D1.	2.3	22.7	1.2	620-42	200	6.0
D2.	3.0	19.1	0.8	550-38	280	3.3
D5.	2.5	25.7	1.6	475-42	420	8.0
D6.	2.6	26.6	1.7	475-46	430	8.5
D7.	3.0	21.7	1.1	720-37	390	9.5
D8.	3.4	30.0	2.2	620-50	600	15.5
						190



a/



6/

Рис. 7.4.1. Осциллограммы импульсов в диоде /а/ и на э.в.п. /б/ в эксперименте с осенним ВМГ

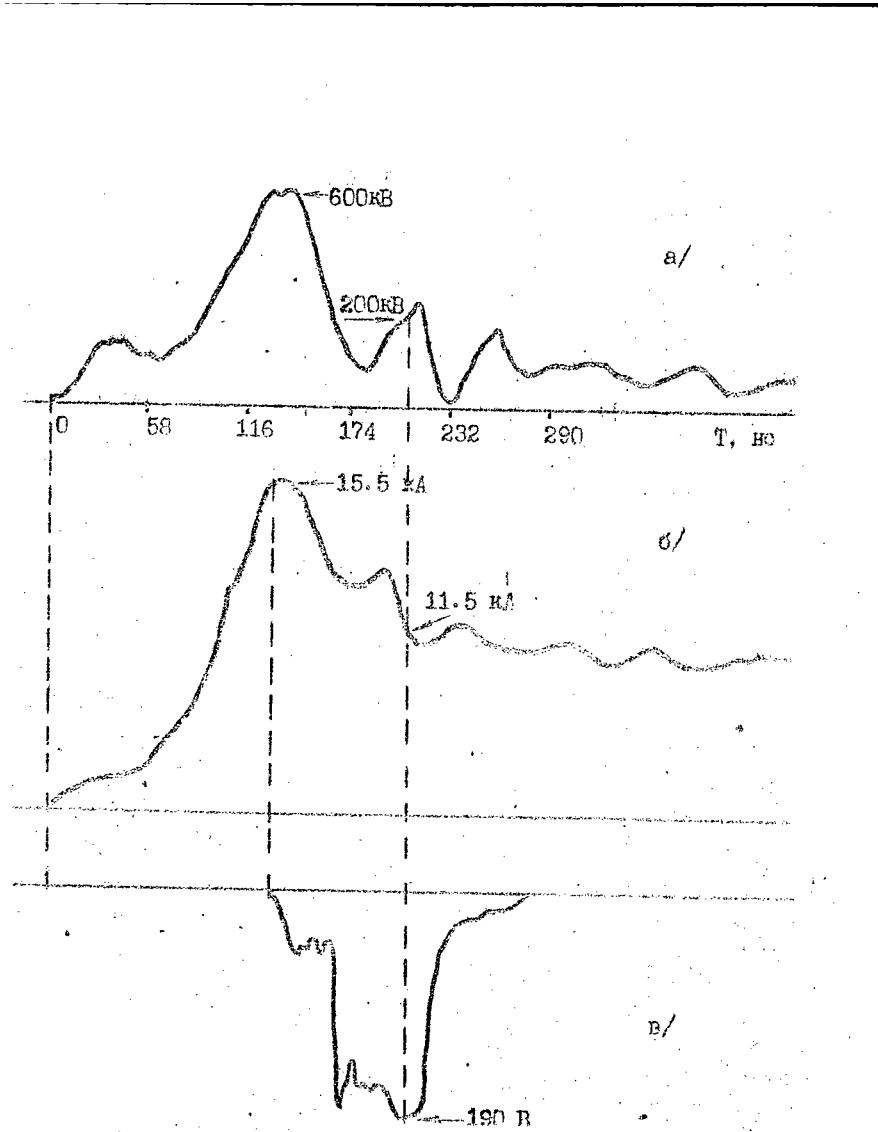


Рис. 7.4.2. Осциллограммы импульсов напряжения /а/, тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/ в эксперименте с коническим ВМГ.

VIII. ОБСУДИТЕЛЬ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ.

На основе экспериментального исследования ВМГ с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку разработаны модели ВМГ и ЭПП для расчета электрической схемы запитки виркатора. Анализ электрической цепи позволил сформулировать требования к импульсам, вырабатываемым ВМГ, и на основании этих требований созданы конкретные компактные устройства для безтрансформаторной схемы.

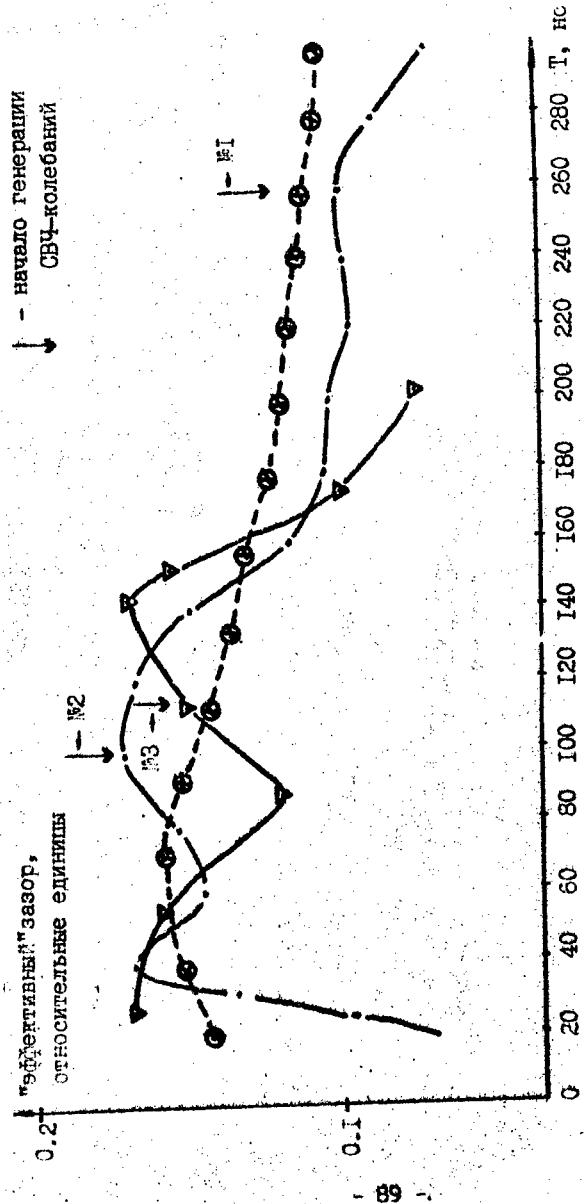
Проведенные эксперименты показали работоспособность предложенной нами безтрансформаторной схемы запитки излучателя - виркатора от вертвомагнитных генераторов. К виркатору подводили импульсы напряжений до 600 кВ с фронтом нарастания 60 нс при токе до 10 кА. Пиковая мощность выведенного в атмосферу СВЧ-излучения составила ~100 МВт при мощности в электронном пучке до 10 ГВт.

В ходе экспериментов обнаружено значительное отличие процесса генерации СВЧ-излучения по сравнению с наблюдаемым в традиционных схемах, когда в триоде в качестве источника напряжения используются сильноточные ускорители прямого действия. В качестве накопителя энергии в таких источниках напряжения применяется ГМН по схеме Аркадьева-Маркса, а импульс напряжения формируется с помощью двойных формирующих линий и газовых коммутаторов. В экспериментах на сильноточных ускорителях генерация начинается при дисковых токах не более 10 кА, как правило, на переднем фронте импульса напряжения (и импульса тока), а прекращается на спаде импульса напряжения. При длительностях $\tau_d = 80-2100$ нс импульса напряжения генерация прекращается в конце импульса напряжения, и длительность импульса СВЧ сравнима с длительностью импульса напряжения. В этих экспериментах в время генерации СВЧ излучения катод-анодный промежуток не заполняется катодной и анодной плазмой. С момента генерации и до конца процесса генерации катод-анодный промежуток работает в режиме ограничения пространственного заряда. При этом создаются стабильные условия формирования виртуального катода, фазовой группировки и селекции частиц в триоде, что позволяет гене-

рировать в триоде СВЧ-излучение с высокой эффективностью (к.п.д. 10-30%).

В экспериментах по схеме I генерация начиналась при пусковом токе 7 кА и протекала обычным образом. Катод-анодный промежуток работал в режиме ограничения пространственного заряда. Об этом свидетельствует график зависимости изменения эффективного зазора катод-анодного промежутка за время действия импульса напряжения (рис.8.1, кривая 1). Из графика видно, что в случае работы триода от ГИНа, со временем происходит уменьшение эффективного зазора катод-анодного промежутка, что характерно для взрывоэмиссионных диодов, работающих в режиме ограничения пространственного заряда. Уменьшение зазора за время действия импульса напряжения объясняется перекрытием катод-анодной плазмой промежутка катод - анод. Так как достижение пускового значения тока происходит через 220-240 нс после подачи напряжения на промежуток катод-анод, то за это время плазма успевает заполнить промежуток. Это приводит к нарушению стационарного состояния системы с виртуальным катодом и к снижению эффективности генерации.

В экспериментах по схемам 2-4 процесс генерации начинался при токах значительно больше пусковых и протекал на спаде импульсов напряжения и тока. Генерация на спаде импульса напряжения происходит в условиях нарушения стабильного состояния формирования виртуального катода, группировки и селекции частиц в генераторе, приводит к нарушению стабильности частоты СВЧ излучения. Все это резко снижает эффективность генерации. Поэтому уровень мощности генерируемых колебаний при полученных параметрах импульса напряжения и тока был сравнительно невысок. Загаздывание процесса генерации и его начало при токах, значительно превышающих пусковые для данного виркутора, очевидно, связано с тем, что до момента генерации в катод-анодном промежутке были нарушены условия работы промежутка в режиме ограничения пространственного заряда. Об этом свидетельствуют полученные зависимости изменения эффективного зазора катод-анодного промежутка за время действия импульса напряжения (рис.8.1, кривые 2,3). Наиболее возрастаршего участка на кривых в интервале времени 60-100



Фиг. 8.1. Изменение "эффективного" зазора между катодом и анодом в триоде: M1-схема I, M2-схема II, M3-схема III.

нс (кривая 2) и 90-150 нс (кривая 3) говорит об увеличении эффективного зазора, что противоречит физическим представлениям работы взрывоэмиссионных триодов.

Для повышения коэффициентов преобразования и передачи энергии в рассмотренной схеме требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диценко А.Н., Аразин А.П., Жермишин А.Г. и др.- В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника, Горький, ИКФ АН СССР, 1984, вып.4, с.104-118.
2. Бугаев С.П., Кичаев В.И., Кликов А.И. и др.- Радиотехника и электроника, 1987, т.32, № 7, с. 1488-1498.
3. Burkhardt S.- J.Appl. Phys., 1987, vol.62, N 1, p.75-78.
4. Аваркевич Е.И., Диценко А.Н., Долгополов П.В. и др.- ДАН СССР, 1991, т.319, №2, с.352-355.
5. Бродский А.Я., Вдовин В.А., Корженевский А.В. и др.- ДАН СССР, 1990, т.314, № 4, с.846-849.
6. Сахаров А.Д., Лоддаев Р.З., Смирнов Е.Н. и др.- ДАН СССР, 1965, т.165, № 1, с.65-68.
7. Павловский А.И., Лоддаев Р.З. В сб. Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики,- Москва: Наука, 1984, с.206.
8. Месец Г.А., Исааков С.А., Коляк Н.И., Пелико Е.А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения,- Москва: Энергоатомиздат, 1983.
9. Bromberg A., Kebs R.A., Huttlin G.A. et al. IEEE International Conference in Plasma Science, Abstracts, Arlington, 1987, p. 39.
10. Диценко А.Н., Жермишин А.Г., Сулакянин А.С. и др.- Письма в ЯТФ, 1983, т.9, вып.24, с.1510-1513.
11. Жермишин А.Г., Исааков В.П., Лопатин Н.В. и др.- ТВТ, 1990, т.28, № 5, с.988-998. Исследование работы спиральных взрывомагнитных генераторов с осевым инициированием А.А.Беликов, П.В.Долгополов, А.Г.Жермишин и др.- АН СССР, Ин-т хим.физ. Препринт-Черноголовка, 1989.-44 стр.
12. Zherlitsyn A.G., Isaakov V.P., Lopatin N.V. et al. In book: Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. New York, Nova Science Publishers, 1990, p.607-613.

13. Расчетная модель электровзрывного прерывателя тока Е.И.Азаревича, А.В.Кобмучко, О.А.Котов, Т.А.Лисецкая Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы Тез. докл. совместного заседания секции науч.советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроснегретики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики" Томск, 27-28 ноября 1986 г.-Томск, 1986.- с.109-III.
14. Бурцев В.А., Калинин И.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках.-М.: Энергоатомиздат, 1990.-288 с.
15. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля,-Москва: Мир, 1972.
16. Fowler C.M., Peteraon D.R., Kerrick J.F., et.al. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В.М. и Швецова Г.А. М.: Наука, 1984, с.282.
17. Jones C.R., Fowler C.M., Ware F.D. In book: Megagauss Technology and Pulsed Power Application. New York and London, Plenum Press, 1987, p.747.
18. Давыдов В.А., Чернышев В.К. - ПМТФ, 1981, N 6, с.112-117.
19. Павловский А.И., Любаев Р.З., Брылев А.С. и др. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В.М. и Швецова Г.А. М.: Наука, 1984, с.312.
20. Калантаров Н.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей:Справочная книга.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Chernyshev V.K., Zhurinov E.I., Kazakov S.A., et.al. In book: Megagauss Technology and Pulsed Power Application. New York and London, Plenum Press, 1987, p.455.
22. Пробивные напряжения электровзрывных прерывателей тока Е.И.Азаревича, О.А.Котов, И.А.Миронова, О.И.Сосокин/ Тез.-докл.совместного заседания секции науч.советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроснегретики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики" Томск, 27-28 ноября 1986 г.-Томск, 1986.- с.105-107.
23. Арутюнян О.В., Заметкин С.Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране.- Из-во МИУ, 1990.-336 с.

24. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975, 735 с.
25. Швецов Г. А., Матросов А. Д. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В. М. и Швецова Г. А. М.: Наука, 1984, с. 263.

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)	2. REPORT DATE	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED
	1995	Final report/Interim Report
4. TITLE AND SUBTITLE		5. FUNDING NUMBERS
Generation of High Power Microwave Radiation with the Aid of High Explosive. Russian		F6170894W0777
6. AUTHOR(S)		N/A
V. Mintsev		
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)		N/A
Institute of Problems of Chemical Physics Moscow Region Chernogolovka 142432 Russia		
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)		10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER
EOARD PSC 802 Box 14 FPO 09499-0200		SPC 94-4101
11. SUPPLEMENTARY NOTES		
Includes the interim report "Magnetic Flux Compressors with Flux Trapping" in English.		
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT		12b. DISTRIBUTION CODE
Approved for public release; distribution is unlimited.		A
ABSTRACT (Maximum 200 words)		
<p>The present paper looks into the Magnetic Flux Compressors (MFC) from the point of view of their integration with high power microwave sources. First of all the typical constructions and principals of there operations will be considered. After that the possibilities of production of video impulse will be discussed and MFC as a pulsed power system for feeding relativistic microwave generators will be described.</p>		
14. SUBJECT TERMS		15. NUMBER OF PAGES
EOARD, Russian, magnetic, flux, compressors, microwave		93 and 39
		16. PRICE CODE N/A
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT UNCLASSIFIED
		20. LIMITATION OF ABSTRACT UL

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)
Prescribed by ANSI Std. Z39-18
298-102